Elektronica en Telecommunicatie 7

Gemeenschappelijke publikatie van de
Sectie voor Telecommunicatietechniek van het K.I.v.I. en het
Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap.

Redactie-adres: Prinsessegracht 23, Den Haag.

Sequente detectie[1])

621.391.82:621.396.96:519.2

door ir. G. A. van der Spek, Physisch Laboratorium RVO-TNO, 's-Gravenhage

Summary: *Sequential Detection.*
After introducing detection theory as derived from the theory of testing statistical hypotheses, conventional detection, with a fixed observation interval, is confronted with sequential detection, with an observation interval which depends on the progress of the test. The optimum sequential test is reviewed and compared with conventional detection in the case of bandlimited detection of a known signal in white Gaussion noise. The application of sequential detection in radar and sonar is indicated.

1. Inleiding

In de toetsingstheorie beschouwt men het volgende probleem. Een aantal waarnemingen $x_1, x_2, \ldots$ voldoet aan een simultane verdelingsdichtheid $p(x_1, x_2, \ldots/\Theta)$, welke afhangt van de waarde van een parameter Θ. Aan de hand van een eindig aantal n van deze waarnemingen wenst men de hypothese H_0 te toetsen, volgens welke $\Theta = \Theta_0$. Hiertoe maakt men gebruik van een toetsingsgrootheid t, welke een functie is van de waarnemingen $x_1, \ldots, x_n$, bijvoorbeeld een schatting van Θ. Voor deze toetsingsgrootheid wordt nu de verdelingsdichtheid berekend voor $\Theta = \Theta_0 : p(t/\Theta_0)$. Voor een bruikbare toetsingsgrootheid zal deze verdeling in het algemeen één-toppig zijn (zie fig. 1).

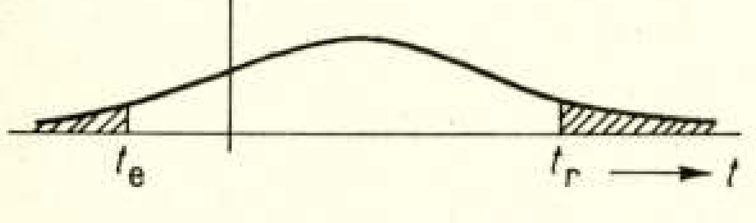


Fig. 1. Verdelingsdichtheid $p(t/\Theta)$ voor $\Theta = \Theta_0$.

De bij de gedane waarnemingen behorende toetsingsgrootheid t kan nu in het centrum van de kansverdeling vallen, waarop wordt besloten tot aanvaarden van hypothese H_0, dan wel t kan liggen buiten het interval (t_l, t_r), waarop verwerpen van H_0 volgt. De kans op een fout van de eerste soort (verwerpen van H_0 als $\Theta = \Theta_0$) is

$$\int_{-\infty}^{t_l} p(t/\Theta_0)\,\mathrm{d}t + \int_{t_r}^{\infty} p(t/\Theta_0)\,\mathrm{d}t$$

[1]) Voordracht gehouden voor het NERG tijdens werkvergadering op 20 maart 1967 te Utrecht.
Manuscript ontvangen 22 juni 1967.

Is er naast de H_0-hypothese $\Theta = \Theta_0$ slechts één alternatieve hypothese $H_1 : \Theta = \Theta_1 > \Theta_0$ dan is een bruikbare toetsingsgrootheid het waarschijnlijkheidsquotiënt.

$$t = l(x_1, \ldots, x_n) = \frac{p(x_1, \ldots, x_n/\Theta_1)}{p(x_1, \ldots, x_n/\Theta_0)}$$

(Dit is ook een stochastische grootheid.)

De verdelingsdichtheid van dit waarschijnlijkheidsquotiënt onder beide hypotheses kan worden berekend (fig. 2 geeft een voorbeeld).

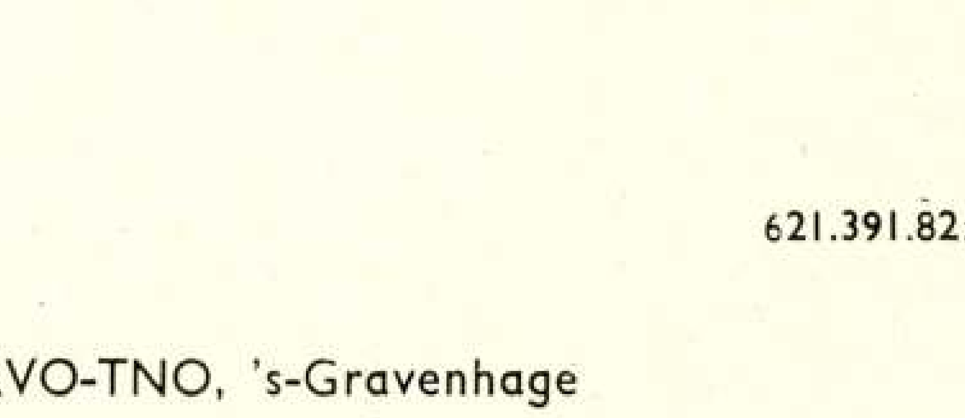


Fig. 2. Verdelingsdichtheid van $l(\Theta)$ voor $\Theta = \Theta_0$ en $\Theta = \Theta_1$.

Veronderstel dat we de toets beëndigen na een vast aantal waarnemingen n. De overschrijdingsdrempel L hangt samen met de gekozen foutenkans van de eerste soort

$$\alpha = \int_L^{\infty} p(l/\Theta_0)\,\mathrm{d}l \tag{1.1}$$

De foutenkans van de tweede soort, dit is de kans op besluiten tot H_0 indien H_1 juist is, wordt

$$\beta = \int_0^L p(l/\Theta_1)\,\mathrm{d}l \tag{1.2}$$

Worden zowel α als β voorgeschreven dan kan dit alleen door het aantal waarnemingen n de juiste waarde te geven, immers

$$p(l/\Theta) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}l} \int \cdots\cdots\cdots \int p(x_1, \ldots, x_n/\Theta)\,\mathrm{d}x_1 \ldots \mathrm{d}x_n$$
$$l(x_1, \ldots, x_n) < 1 \tag{1.3}$$

kan, bij gegeven simultane verdeling $p(x_1, \ldots, x_n/\Theta)$, alleen beinvloed worden door wijziging van n. (In feite kunnen bij een bepaalde α slechts aftelbaar veel β's worden gerealiseerd en om-

gekeerd; we bepalen ons hier stilzwijgend tot de mogelijke (α,β) combinaties).

In de detectietheorie, waarin het gaat om de aanwezigheid van signaal in ruis te detecteren, correspondeert $\Theta=\Theta_0$ met ruis alleen en $\Theta=\Theta_1$ met signaal + ruis; Θ kan dus de signaal-ruis verhouding voorstellen ($\Theta_0=0$).

In de conventionele detectietheorie is nu de probleemstelling: hoe, bij gegeven verdelingsdichtheid $p(x_1,\ldots,x_n/\Theta)$ en gegeven aantal observaties n en een gekozen loosalarmkans α, een minimale miskans β te verkrijgen. De besproken toets met het waarschijnlijkheidsquotiënt is het antwoord hierop (zie bijvoorbeeld [1]).

Bij sequente detectie is het aantal waarnemingen geen vaste grootheid. Men kan de vraag stellen: hoe, bij gegeven $p(x_1,\ldots,x_m/\Theta)$, een toets te realiseren met voorgeschreven α en β, zodanig dat de verwachting van het aantal waarnemingen, $E[n]$, minimaal is. Dit probleem is het eerst door Wald [2] behandeld. Hij heeft aangetoond dat voor de sequente waarschijnlijkheidsquotiënttoets (sequential probability ratio test) voor iedere gekozen (α,β) combinatie geldt:

$$E[n(\Theta_0)]\leqq E_t[n(\Theta_0)]$$

$$E[n(\Theta_1)]\leqq E_t[n(\Theta_1)]$$

waarin t slaat op iedere denkbare andere toets, welke dezelfde (α,β)-waarden realiseert. Met andere woorden: de sequente waarschijnlijkheidsquotiënttoets is de best denkbare toets.

2. De sequente waarschijnlijkheidsquotiënttoets

2.1. *Toetsprocedure*

Er worden twee getallen A en B gekozen, welke bij goede benadering bepaald worden door de foutenkansen van eerste en tweede soort volgens:

$$A=\frac{1-\beta}{\alpha}\text{ en } B=\frac{\beta}{1-\alpha} \tag{2.1}$$

Vervolgens wordt een eerste waarneming x_1 gedaan en het waarschijnlijkheidsquotiënt berekend:

$$l(x_1)=\frac{p(x_1/\Theta_1)}{p(x_1/\Theta_0)}$$

Er zijn nu drie mogelijkheden:

$l(x_1)\geqq A\rightarrow$ beëindigtoets met besluit: H_1 is waar.

$l(x_1)\leqq B\rightarrow$ beëindigtoets met besluit: H_0 is waar.

$B<l(x_1)<A$, waarneming valt in de toetszone $\rightarrow$ doe een volgende waarneming.

Deze procedure wordt nu herhaald voor

$$l(x_1,x_2)=\frac{p(x_1,x_2/\Theta_1)}{p(x_1,x_2/\Theta_0)}\quad\text{en dezelfde grenzen } A \text{ en } B,$$

waarbij een beslissing wordt genomen ten gunste van H_1 of H_0 dan wel weer een volgende waarneming wordt gedaan, enz.

2.2. *Foutenkansen en verwachting van het aantal waarnemingen*

Duiden we de laatste observatie, welke het waarschijnlijkheidsquotiënt voor het eerst buiten de toetszone brengt, aan met x_n, dan geldt:

$p(x_1,\ldots,x_n/\Theta_1)\leqq B\,p(x_1,\ldots,x_n/\Theta_0)$ indien tot H_0 besloten wordt of

$p(x_1,\ldots,x_n/\Theta_1)\geqq A\,p(x_1,\ldots,x_n/\Theta_0)$ indien tot H_1 besloten wordt.

Sommeren we nu over alle waarnemingsreeksen $(x_1,\ldots,x_n)$, welke inderdaad leiden tot H_0 dan volgt:

$$\beta\leqq B(1-\alpha)$$

en evenzo door sommeren over alle observaties, welke leiden tot accepteren van H_1:

$$1-\beta\geqq A\alpha$$

In de volgende paragraaf zal worden aangetoond dat, voor $E[n]$ niet te klein, gelijktekens een goede benadering vormen, zodat als eenvoudig verband tussen toetsgrenzen en foutenkansen geldt:

$$A=\frac{1-\beta}{\alpha}\text{ en } B=\frac{\beta}{1-\alpha} \tag{2.1}$$

Een fraai bewijs van dit verband voor een analoog diffusieproces wordt gegeven in [3].

Uit de aard van de grenzen volgt

$$A>B \text{ dus } \frac{1-\beta}{\alpha}>\frac{\beta}{1-\alpha},\qquad \text{zodat } \alpha+\beta<1, \text{ waaruit weer volgt:}$$

$$A>1 \text{ en } B<1$$

Zijn de observaties x_i onafhankelijke trekkingen uit een verdeling met dichtheid $p(x_i/\Theta_1)$ dan wel $p(x_i/\Theta_0)$, dan geldt:

$$l(x_1,\ldots,x_m)=\prod_{i=1}^{m}\frac{p(x_i/\Theta_1)}{p(x_i/\Theta_0)} \tag{2.2}$$

Voeren we de logaritme van het waarschijnlijkheidsquotiënt in, dan gaat (2.2) over in:

$$Z_m=\ln l(x_1,\ldots,x_m)=\sum_{i=1}^{m}z_i$$

$$\text{met } z_i=\ln\frac{p(x_i/\Theta_1)}{p(x_i/\Theta_0)} \tag{2.3}$$

Valt de beslissing na de n^e observatie (dus $Z_n\geqq\ln A$ of $Z_n\leqq\ln B$) dan geldt:

$$E[Z_n]=E[n]\cdot E[z]$$

waarin

$$E[z]=\int p(x/\Theta)\ln\frac{p(x/\Theta_1)}{p(x/\Theta_0)}\,dx$$

(zie voor een bewijs hiervan bijvoorbeeld [4]).

Deze relatie geldt uiteraard onder beide hypotheses, dus:

$$E[Z_n(\Theta_1)]=E[n(\Theta_1)]\cdot E[z(\Theta_1)]\quad\text{en}$$

$$E[Z_n(\Theta_0)]=E[n(\Theta_0)]\cdot E[z(\Theta_0)]$$

Als we de beslissingsdrempels wegen met de kansen dat ze worden bereikt vinden we een tweede (benaderende) uitdrukking voor $E[Z_n]$:

$$E[Z_n(\Theta_1)]=(1-\beta)\ln A+B\ln B$$

$$E[Z_n(\Theta_0)]=\alpha\ln A+(1-\alpha)\ln B$$

Voor de verwachting van het aantal observaties $E[n]$ kunnen we met (2.1) dus schrijven:

$$\left.\begin{aligned} E[n(\Theta_1)]&=\frac{(1-\beta)\ln\dfrac{1-\beta}{\alpha}+\beta\ln\dfrac{\beta}{1-\alpha}}{E[z(\Theta_1)]}\\ &\text{en}\\ E[n(\Theta_0)]&=\frac{\alpha\ln\dfrac{1-\beta}{\alpha}+(1-\alpha)\ln\dfrac{\beta}{1-\alpha}}{E[z(\Theta_0)]}\end{aligned}\right] \tag{2.4}$$

De tellers van deze uitdrukkingen worden dus bepaald door α en β, de noemers door de verdelingsdichtheid $p(x/\Theta)$.

2.2.1. De benaderingen voor α, β en $E[n]$

Het gebruikte verband tussen de grenzen van het waarschijnlijkheidsquotiënt en de gewenste foutenkansen is:

$$A = \frac{1-\beta}{\alpha} \text{ en } B = \frac{\beta}{1-\alpha}$$

De werkelijk bij deze grenzen behorende foutenkansen α' en β' voldoen echter aan:

$$A \leqq \frac{1-\beta'}{\alpha'} \text{ en } B \leqq \frac{\beta'}{1-\alpha'} \qquad (2.5)$$

Door combinatie met (2.1) vinden we:

$$\alpha(1-\beta') \geq \alpha'(1-\beta)$$

$$\beta(1-\alpha') \geq \beta'(1-\alpha)$$

waaruit na optelling volgt:

$$\alpha + \beta \geq \alpha' + \beta' \qquad (2.6)$$

De som van de werkelijk optredende foutenkansen is dus niet groter dan die van de beoogde foutenkansen.

Verder geldt:

$$\left.\begin{aligned} \alpha' &\leqq \frac{\alpha'}{1-\beta'} \leqq \frac{1}{A} = \frac{\alpha}{1-\beta} \\ \beta' &\leqq \frac{\beta'}{1-\alpha'} \leqq B = \frac{\beta}{1-\alpha} \end{aligned}\right] \qquad (2.7)$$

zodat de werkelijk optredende loosalarmkans α' niet groter kan zijn dan $\frac{\alpha}{1-\beta}$ en de werkelijk optredende miskans β' niet groter dan $\frac{\beta}{1-\alpha}$, waarbij, gezien (2.6), slechts één van beide groter kan zijn dan de beoogde waarde.

Voor (α,β)-waarden gebruikelijk bij radardetectie ($\alpha \approx 10^{-6}$, $\beta \approx 10^{-1}$) is (2.1) dus een goede benadering.

Volgen we het verloop van de logaritme van het waarschijnlijkheidsquotiënt, $Z_m = \sum_{i=1}^{m} z_i$, gedurende het verstrijken van de toets dan zien we voor iedere herhaling (in het algemeen) weer een ander verloop (zie fig. 3).

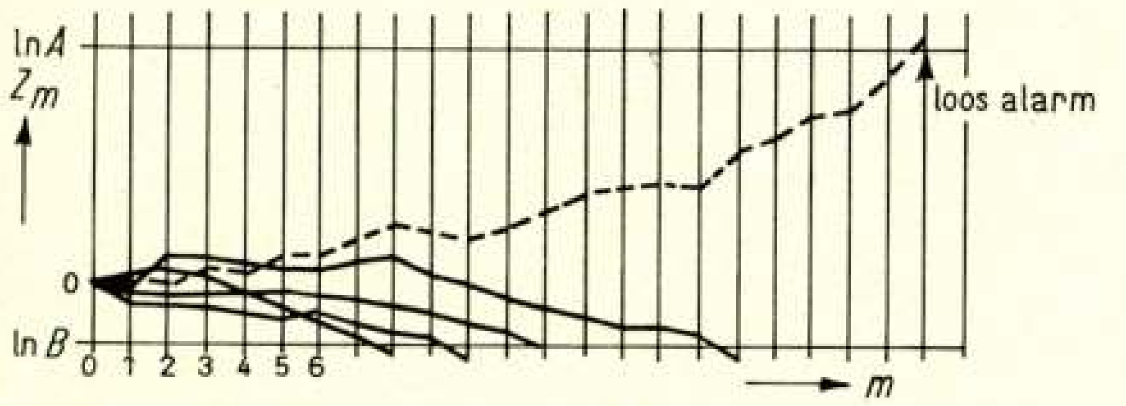


Fig. 3. Verloop van Z_m voor $\Theta = \Theta_0$.

Zouden alle sporen precies op de grenzen $\ln A$ en $\ln B$ eindigen, dan zou gelden: $\alpha' = \alpha$ en $\beta' = \beta$. Naarmate de overschrijdingen van de grenzen kleiner worden wordt dit een betere benadering. Deze overschrijdingen nemen af naarmate de verhoudingen $\ln A/E[z(\Theta_1)]$ en $\ln B/E[z(\Theta_0)]$ toenemen, hetgeen weer correspondeert met aangroeiende $E[n(\Theta_1)]$ en $E[n(\Theta_0)]$

De benaderingen in (2.1) en (2.4) zijn dus beter naarmate de verwachting van het aantal observaties groter is.

3. Conventionele versus sequente detectie

Zoals Wald heeft bewezen is er geen toets denkbaar, welke voor gelijke foutenkansen (α,β) kleinere verwachtingen voor het aantal observaties heeft dan de sequente waarschijnlijkheidsquotiënttoets. Het is interessant na te gaan in welke mate deze sequente detectie (gemiddeld) kan volstaan met een kleiner aantal observaties dan de conventionele detectie. Daar de detectietijd evenredig is met het aantal waarnemingen houdt dit in dat de gemiddelde detectietijd in dezelfde mate kan worden verkort, wat voor praktische toepassingen (radar, sonar) van belang kan zijn. Ter illustratie zal nu zo'n vergelijking worden gemaakt voor een fictief detectieprobleem.

3.1. Coherente detectie van een bekend signaal in witte gauss-ruis

Een ontvangstsignaal $X(t)$ bestaat uit gauss-ruis[2]) $N(t)$, met een bandbreedte W en een uniform spectrum en met een variantie σ^2, waarin vanaf $t = 0$ (begin van detectie-interval) een volkomen bekend signaal $S(t)$ al dan niet aanwezig is. Het signaal voldoet aan de conditie dat het vermogen $E_\tau[S^2(t)]$, genomen over een interval τ dat kort is ten opzichte van de detectietijd, niet met de tijd verloopt (bijvoorbeeld: $S(t)$ is periodiek met een periode $\leqq \tau$).

Er geldt dus onder hypothese $H_0 : X(t) = N(t)$ $\qquad (N)$

en onder hypothese $H_1 : X(t) = S(t) + N(t)$ $\qquad (SN)$

We nemen aan dat het signaalspectrum geheel binnen het ruisspectrum ligt. Vanaf $t = 0$ worden waarnemingen X_i gedaan, met een interval van $\frac{1}{2W}$ s, zodat de N_i-waarden ongecorreleerd mogen worden verondersteld. Zonder verlies in algemeenheid kunnen we de X_i vervangen door genormeerde waarden $x_i = \frac{X_i}{\sigma}$ zodat:

$$x_i = n_i \qquad (N)$$

dan wel $x_i = s_i + n_i$ $\qquad (SN)$

waarin n_i een ruisbemonstering met verdelingsdichtheid

$$q(n_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{n_i^2}{2}\right)$$

Voor s_i geldt dat

$$E[s_i^2] = E\left[\frac{S_i^2}{\sigma^2}\right] = \frac{1}{2W\tau} \sum_{i=1}^{2W\tau} \frac{S_i^2}{\sigma^2} = a^2$$

de signaal-ruis (vermogens) verhouding voorstelt.

3.1.1. Sequente detectie

Er geldt

$$z_i = \ln \frac{p(x_i/SN)}{p(x_i/N)} = \ln \frac{q(x_i - s_i)}{q(x_i)} = \tfrac{1}{2}\,(2x_i s_i - s_i^2)$$

zodat:

$$\begin{aligned} E[z_i/SN] &= E[s_i \cdot (x_i/SN)] - \tfrac{1}{2}E[s_i^2] \\ &= E[s_i \cdot (s_i + n_i)] - \tfrac{1}{2}E[s_i^2] \\ &= \tfrac{1}{2}E[s_i^2] + E[s_i] \cdot E[n_i] = \tfrac{1}{2}a^2 \end{aligned}$$

[2]) Met ruis wordt bedoeld een stationair stochastisch proces met gemiddelde 0. De toevoeging 'gauss-' houdt in dat de verdelingsdichtheid van de ruisamplitude normaal is. Met een uniform (wit) spectrum wordt aangegeven dat de spectrale vermogensdichtheid van de ruis over het hele ruisspectrum gelijk is.

en

$$E[z_i/N]=E[s_i\cdot(x_i/N)-\tfrac{1}{2}E[s_i^2]$$
$$=E[s_i]\cdot E[n_i]-\tfrac{1}{2}a^2=-\tfrac{1}{2}a^2$$

Volgens (2.4) is dus:

$$\left.\begin{aligned} E[n/SN]&=2\,\frac{(1-\beta)\ln\dfrac{1-\beta}{\alpha}+\beta\ln\dfrac{\beta}{1-\alpha}}{a^2}\\ E[n/N]&=2\,\frac{-\alpha\ln\dfrac{1-\beta}{\alpha}-(1-\alpha)\ln\dfrac{\beta}{1-\alpha}}{a^2}\end{aligned}\right]\quad(3.1)$$

Aangezien $2WT=n$ geldt voor de sequente waarschijnlijkheidsquotiënttoets voor de verwachte detectietijd:

$$\left.\begin{aligned} E[T/SN]&=\frac{(1-\beta)\ln\dfrac{1-\beta}{\alpha}+\beta\ln\dfrac{\beta}{1-\alpha}}{Wa^2}\\ E[T/N]&=\frac{-\alpha\ln\dfrac{1-\beta}{\alpha}-(1-\alpha)\ln\dfrac{\beta}{1-\alpha}}{Wa^2}\end{aligned}\right]\quad(3.2)$$

3.1.2. Conventionele detectie

Voor klassieke detectie volgt het verband tussen α, β en n (vast) uit (1.1) ... (1.3). Voor het hier beschouwde geval geldt (zie bijvoorbeeld [1], pag. 58):

$$\left.\begin{aligned} &\alpha=\operatorname{erf}\lambda\left(=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_\lambda^\infty\exp-\frac{v^2}{2}\,dv\right)\\ &\beta=1-\operatorname{erf}(\lambda-d)\\ &\text{waarin}\\ &d=\sqrt{\frac{2E(S)}{N_0}}^{\,3)}=\sqrt{\frac{2W\cdot T_c\,\dfrac{E(S)}{T_c}}{\sigma^2}}=a\sqrt{2WT_c}\\ &\text{zodat}\quad T_c=\frac{d^2}{2Wa^2}\end{aligned}\right]\quad(3.3)$$

[3]) Hierin is $E(S)$ de energie in het signaal $S(t)$ van $t=0$ tot $t=T_c$ en N_0 de éénzijdige spectrale vermogensdichtheid van de ruis.

3.1.3. Vergelijking van de toetslengten

Combinatie van (3.2) en (3.3) levert

$$\left.\begin{aligned} \frac{E[T/SN]}{T_c}&=2\,\frac{(1-\beta)\ln\dfrac{1-\beta}{\alpha}+\beta\ln\dfrac{\beta}{1-\alpha}}{d^2}\\ \frac{E[T/N]}{T_c}&=2\,\frac{-\alpha\ln\dfrac{1-\beta}{\alpha}-(1-\alpha)\ln\dfrac{\beta}{1-\alpha}}{d^2}\end{aligned}\right]\quad(3.4)$$

Daar d direct volgt uit α en β hangen $E[T/SN]/T_c$ en $E[T/N]/T_c$ niet af van de bandbreedte W en de signaal-ruis verhouding a^2. In fig. 4 is $E[T]/T_c=E[n]/n_c$ als functie van de miskans β weergegeven voor vier waarden van de loosalarmkans α (n_c staat hier voor het equivalente aantal observaties bij conventionele detectie).

3.2. Nadere beschouwing

Het behandelde voorbeeld is karakteristiek voor de relatie tussen sequente en conventionele detectie. Zoals verwacht wordt geldt steeds: $E[n]<n_c$. Bij een vaste loosalarmkans vertoont $E[n]/n_c$ een maximum (nl. bij een miskans $\beta_{max}\approx 0{,}2$) bij aanwezig signaal; bij geen signaal neemt $E[n]/n_c$ monotoon af met stijgende β. Bij vaste $\beta(\beta<\beta_{max})$ en afnemende α neemt $E[n]/n_c$ toe bij aanwezig en af bij ontbrekend signaal.

In detectiesituaties interesseren we ons meestal niet voor miskansen kleiner dan 1%. Daar voor $\beta>1\%$ $E[n/N]/E[n/SN]<1$ is het te behalen voordeel bij sequente detectie voornamelijk bij afwezigheid van signaal en dit in sterkere mate naargelang α kleiner is. Een radarinstallatie, welke een vrijwel leeg gebied afzoekt met een kleine loosalarmkans, wint dus veel bij sequente detectie.

Het verschil tussen conventionele en optimale sequente detectie kan als volgt worden aangegeven:

Bij sequente detectie wordt gestreefd naar een beslissing gebaseerd op een vaste overtuigingskracht (= drempelwaarden van het waarschijnlijkheidsquotiënt); wordt deze bereikt dan wordt de toets beëindigd. Het aantal observaties wordt dus aangepast

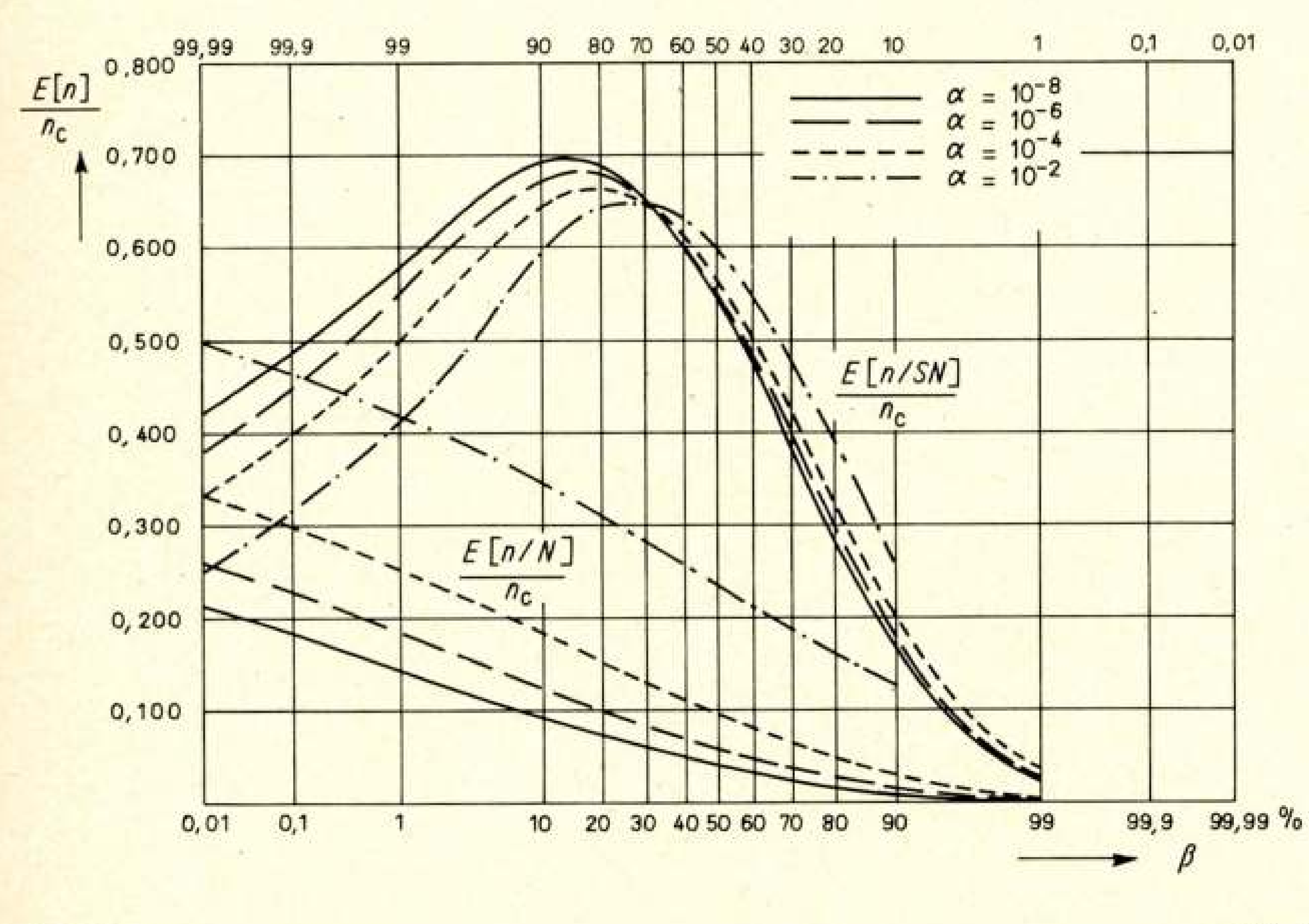


Fig. 4. $E[n]/n_c$ voor coherente detectie van bekend signaal in witte gauss-ruis.

aan de totale overtuigingskracht erin. Doet de natuur 'gunstige trekkingen' uit het ruis-ensemble dan eindigen we vroeg, zijn de trekkingen minder 'onthullend' dan duurt de toets langer. Bij conventionele detectie eindigt de toets 'domweg' na n observaties, ongeacht het verloop van de overtuigingskracht tijdens de toets. Zie verder de appendix.

4. De verdeling van het aantal observaties

De verwachting van het aantal observaties $E[n]$ geeft slechts het gemiddelde voordeel aan. Kennis van de kansverdeling $P(n)$ zou een volledig beeld geven. In het algemeen kan worden gesteld dat verkleining van $E[n]/n_c$ wordt bereikt ten koste van een toename van var$[n]$ (zie [5], pag. 12).

In het geval van detectie van een bekende gelijkspanning in witte gauss-ruis wordt de verdeling benaderd door die van een overeenkomstig continu proces; die van het tijdstip van eerste overschrijding van boven- en ondergrens van een eendimensionaal continu Markov-proces (diffusieproces, zie [3]).

Is de variantie van de ruis 1 en de gelijkspanning $= a$ dan geldt voor de verdelingsdichtheid van het tijdstip van overschrijden van boven- (+) resp. ondergrens (—) met (SN) en zonder (N) gelijkspanning:

$$
\left.
\begin{aligned}
p^{+}(T/SN) &= \frac{\pi a^2}{(\ln A - \ln B)^2}\sqrt{A}\sum_{i=1}^{\infty}(-1)^i\, i \sin\left(i\pi\frac{\ln B}{\ln A - \ln B}\right).\ \exp\left\{-\left(\frac{\pi^2 i^2}{2(\ln A - \ln B)^2}+\frac{1}{8}\right)a^2 T\right\}\\
p^{+}(T/N) &= \frac{1}{A}p^{+}(T/SN)\\
p^{-}(T/SN) &= -\frac{\pi a^2}{(\ln A - \ln B)^2}\sqrt{B}\sum_{i=1}^{\infty}(-1)^i\, i \sin\left(i\pi\frac{\ln A}{\ln A - \ln B}\right).\ \exp\left\{-\left(\frac{\pi^2 i^2}{2(\ln A - \ln B)^2}+\frac{1}{8}\right)a^2 T\right\}\\
p^{-}(T/N) &= \frac{1}{B}p^{-}(T/SN)
\end{aligned}
\right] \qquad (4.1)
$$

(Deze formules kunnen worden afgeleid uit [3], voorbeeld 5c.) Uiteraard geldt voor het tijdstip van beëindiging van de toets (overschrijden van boven- of ondergrens):

$$p(T) = p^{+}(T) + p^{-}(T)$$

In fig. 5 zijn de verdelingsdichtheden voor diverse (α,β)-combinaties weergegeven. De tijdschaal is zodanig gekozen dat onderlinge vergelijking van de krommen eenvoudig is: we delen T door de verwachting van het tijdstip van beëindiging van de toets $E[T]$, dus $\tau = T/E[T]$.

Er geldt: (zie [3])

$$E[T] = \frac{1}{\mu}\{A(1 - L(\Theta)) + B\,L(\Theta)\}$$

waarin

$$L(\Theta) = \frac{-\exp\left(-\frac{2\mu}{a^2}\right)+1}{\exp\left(-\frac{2\mu}{a^2}B\right) - \exp\left(-\frac{2\mu}{a^2}A\right)}$$

de kans op eindigen op de ondergrens en

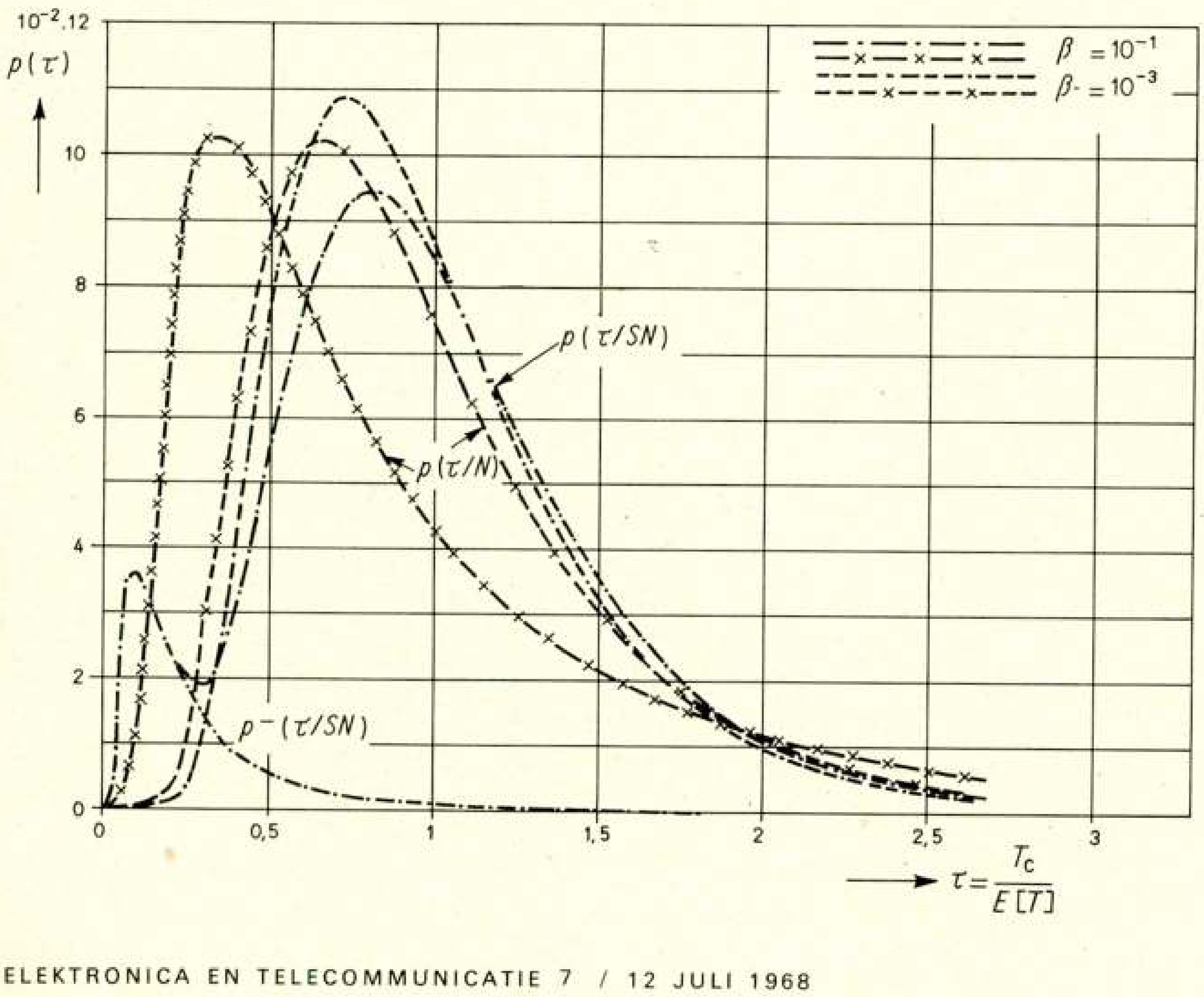


Fig. 5. Genormaliseerde verdelingsdichtheid van het beslissingstijdstip bij detectie van een gelijkspanning in witte gauss-ruis: $\alpha = 10^{-4}$, $\beta = 10^{-1}$ en $\beta = 10^{-3}$.

$\mu = \frac{a^2}{2}$ resp. $-\frac{a^2}{2}$ voor de twee gevallen: signaal aanwezig en afwezig.

Door deze normalisatie worden de krommen tevens onafhankelijk van de signaal-ruis verhouding a^2.

Vergelijken we de verdelingsdichtheden met fig. 4 dan blijkt inderdaad dat naarmate $E[n]/n_c$ afneemt de corresponderende verdelingsdichtheid $p(\tau)$ voor grote τ groter wordt ($\sim$ variantie wordt groter).

De verhoudingen $p^+(T/SN)/p^-(T/SN)$ en $p^+(T/N)/p^-(T/N)$ zijn afhankelijk van de tijd. Voor $\alpha = 10^{-4}$, $\beta = 10^{-1}$ leidt dit tot het merkwaardige resultaat dat bij aanwezig signaal vrijwel alle snelle beslissingen missers zijn.

5. De toepasbaarheid van de resultaten in radar en sonar

De gevonden resultaten maken het gebruik van sequente detectie in radar en sonar aantrekkelijk. Er doen zich echter verschillende problemen voor:

1. Bij radar en sonar is de beslissing niet tussen twee hypotheses H_0 (geen signaal) en H_1 (wel signaal) maar, indien we slechts één doel per zoekrichting toestaan, tussen $k+1$ hypotheses nl. H_0 (geen signaal) en H_i $i = 1,\dots,k$ (signaal in i^e range of Doppler interval). Vatten we dit op als het parallel verlopen van k subtoetsen, dan dienen we ons te realiseren, dat de toets nu eerst eindigt als de laatste van de k subtoetsen de toetszone verlaat (ingeval de beslissing valt op H_0).
2. In de praktijk is de signaal-ruis verhouding niet vooraf bekend. Dit zal, indien de werkelijke signaal-ruis verhouding bijvoorbeeld half zo groot is als de ingestelde waarde, aanleiding geven tot grote waarden voor de verwachting van het aantal observaties [5].

Afbreken van de toets na een maximum aantal waarnemingen (= truncation) is een mogelijke remedie.

3. De onbekende signaal-ruis verhouding hangt bovendien af van de doelsafstand (range).

Aan het gecompliceerde probleem van de toepassing van sequente detectie op radar is reeds door verschillende auteurs aandacht geschonken [6 ... 12].

Een discussie van de door hen verkregen resultaten voert hier te ver. Samenvattend kan worden gezegd dat voor radar een winst in signaal-ruis verhouding van ongeveer 3 dB mogelijk is, zodat sequente detectie een antwoord is op de nieuwe mogelijkheden, welke worden geboden door traagheidsloze antennesystemen.

De auteur betuigt zijn dank aan ir. C. van Schooneveld, ir. L. Wallast en dr. S. B. Weinstein voor waardevolle discussies over dit onderwerp en suggesties voor verbeteringen in het manuscript.

Appendix

In welk opzicht schiet de conventionele toets te kort?

Wald [2] blz. 196 en [13] heeft streng bewezen dat zijn toets een $E[n]$ oplevert, welke, voor gelijke α en β, door geen andere toets wordt verbeterd. Het is evenwel niet eenvoudig in te zien in welk opzicht bijvoorbeeld de conventionele waarschijnlijkheidsquotiënttoets te kort schiet. Weliswaar wordt daarin voorbijgegaan aan de grootte van het waarschijnlijkheidsquotiënt op het moment van de beslissing (alleen het al of niet overschrijden van een drempelwaarde wordt vastgesteld), toch weerspiegelt de verdeling van het waarschijnlijkheidsquotiënt zich in de waarden van α en β volgens (1.1) en (1.2).

We zullen nu de conventionele toets eens toepassen op een eenvoudig probleem, waarbij althans duidelijk wordt dat deze toets met voordeel door een sequente toets kan worden vervangen. Een vaas is gevuld met witte en zwarte ballen. De fractie zwarte ballen is $p(<1/2)$ (hypothese H_0) dan wel $1-p$ (hypothese H_1). Aan de hand van N (oneven) trekkingen met teruglegging dient te worden besloten welke van de twee hypotheses de juiste is. De foutenkansen van beide soort dienen gelijk en minimaal te zijn. Het is duidelijk dat er een monotoon verband bestaat tussen k, het aantal zwarte ballen in N trekkingen en het waarschijnlijkheidsquotiënt l; hoe groter k des te groter l.

Om symmetrieredenen correspondeert de drempelwaarde L van het waarschijnlijkheidsquotiënt met een k-drempel; $K = N/2$ (immers $\alpha = \beta$). Trekken we dus k zwarte ballen met $k > N/2$ dan besluiten we tot hypothese H_1, anders tot H_0.

Gaan we nu eens de hele toets trekking voor trekking na. Is de eindbeslissing H_1 dan zal in het algemeen de $^1/_2(N+1)$e zwarte bal bij de n^e trekking worden verkregen ($N \geqq n > N/2$). Dit impliceert dat de resterende N-n trekkingen, welke de eindbeslissing immers niet meer kunnen veranderen, achterwege hadden kunnen blijven! Hetzelfde geldt, indien de eindbeslissing H_0 is en er $^1/_2(N+1)$ witte ballen zijn getrokken.

In plaats van een vast aantal van N trekkingen kunnen we dus volstaan met een aantal trekkingen $n > N$ waarvan de verwachting is:

$$E[n] = \sum_{n=\frac{N+1}{2}}^{N} n \binom{n}{n-\frac{N+1}{2}} p^{\frac{N+1}{2}} (1-p)^{n-\frac{N+1}{2}} \quad ^{4)}$$

Het is bij de conventionele toets dus mogelijk waarnemingen te doen, die geen invloed hebben op de beslissing. In andere gevallen, zoals de behandelde detectieproblemen, kunnen we stellen dat er waarnemingen kunnen worden gedaan, die slechts een geringe invloed hebben op de eindbeslissing (kleiner naarmate het lopende waarschijnlijkheidsquotiënt verder van de einddrempel verwijderd is), zodat afbreken van de toets weinig verandert aan de foutenkansen.

[4]) Dit resultaat kan, uiteraard, nog worden verbeterd door de optimale toets van Wald, waarbij de bovengrenzen voor het aantal zwarte en witte ballen afhangt van n.

Literatuur

[1] SCHOONEVELD, C. VAN: 'Statistische detectie'. Voordrachten gehouden voor het Ontmoetingscentrum voor Meet- en Regeltechniek, T.H. Delft, 1962.

[2] WALD, A.: 'Sequential analysis', John Wiley & Sons, inc.

[3] DARLING, D. A. en SIEGERT, J. F.: 'The first passage time for a continuous Markov process'. The Annals of Mathematical Statistics 1953, p. 624-639.

[4] JOHNSON, N. L.: 'On the extension of the connection between Poisson and χ^2 distributions'. Biometrika 46, 352.
Het bedoelde bewijs is overgenomen in:
KENDALL, M. G. en STUART, A.: 'The advanced theory of statistics' vol. 2, p. 604.

[5] BUSSGANG, J. J. en MIDDLETON, D.: 'Optimum sequential detection of signals in noise'. IRE Transactions on Information Theory, Dec. 1955.

[6] PRESTON, G.: 'The search and detection efficiency of surveillance and communication devices using sequential probability ratio ana-

lysis'. Proc. Symp. on Decision Theory and Appl. to Electronic Equipm. Dev. vol. 1, p. 100-117, May 1960.

[7] HELSTROM, C. W.: 'A range-sampled sequential detection system'. IRE Trans. on Info. Theory, Jan. 1962.

[8] MARCUS, M. B. en SWERLING, P.: 'Sequential detection in radar with multiple resolution elements'. IRE Trans. on Info. Theory, April 1962.

[9] REED, I. S. en SELIN, J.: 'A sequential test for the presence of a signal in one of *k* possible positions'. IEEE Trans. on Info. Theory, October 1963 (correspondence).

[10] BAUM, R. F.: 'Simple sequential detection tests'. Proc. IEEE, October 1964 (correspondence).

[11] BUSSGANG, J. J. en EHRMAN, L.: 'A sequential test for a target in one of *k* range positions'. Proc. IEEE, May 1965 (correspondence).

[12] BRENNAN, L. E. en HILL, P.S. Jr.: 'A two-step sequential procedure for improving the cumulative probability of detection in radars'. IEEE Trans. on Mil. Electr. July-October 1965.

[13] WALD, A. en WOLFOWITZ, J.: 'Optimum character of the sequential probability ratio test'. The Annals of Math. Stat. 1948, p. 326-339.

621.38:658.56

Kwaliteit en bedrijfszekerheid van elektronische onderdelen [1])

door ir. H. van der Weiden, N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken - Eindhoven

Summary: *Quality and reliability in operation of electronic parts.*
After a short historic introduction reliability, failure rate and M.T.B.F. are discussed. Stress is laid on the possibilities to raise the reliability and on the necessity of the feedback of data about the component behaviour from the equipment user to the equipment manufacturer and the component manufacturer.

Historie

Wij kunnen ons afvragen waarom de bedrijfszekerheid van elektronische onderdelen pas de laatste jaren zo sterk in de belangstelling is gekomen. Voorheen was de apparatuur minder gecompliceerd en werd ze meestal op een klein marktgebied afgezet. Hierdoor konden eventuele storingen gemakkelijk verholpen worden aangezien de reserve-onderdelen op kleine afstand voorhanden waren, vaak van algemeen voorkomend materiaal gebruik kon worden gemaakt en voldoende reparateurs aanwezig waren. De apparatuur is inmiddels steeds gecompliceerder geworden en over de gehele wereld verspreid.

Het in voorraad houden van de ontelbare onderdelen is bezwaarlijk, reparatie kan alleen door opgeleide specialisten gebeuren, de lonen zijn drastisch verhoogd en de schade door het niet functioneren van de apparatuur is zeer veel groter geworden. Wij denken hier aan ruimtevaart, waar reparaties onmogelijk zijn, aan landingsapparatuur op vliegvelden, aan computers, waar bijv. de verloning van een heel bedrijf van de computer afhangt, aan het effect van foutieve berekeningen door computers, aan de ergernis bij slechte telefoonverbindingen en de nationale ramp, wanneer een belangrijke voetbalwedstrijd niet door de t.v. kan worden uitgezonden!

Het heeft mij gefrappeerd dat ook nu nog de bedrijfszekerheidsgedachte op sommige belangrijke plaatsen niet is doorgedrongen. Zo heeft prof. dr. D. Durrer op 21 april 1967 in een voordracht [2]) over medische wetenschap en techniek medegedeeld, dat in 85 pacemakers (hartstimulatoren) die in het lichaam van patiënten werden ingebouwd, totaal 102 fouten waren opgetreden. (Deze pacemakers waren niet van Nederlands fabrikaat.) Het vervangen van een pacemaker betekent operatie van een patiënt. Prof. Durrer concludeerde hieruit dat dit elektronische apparaat kennelijk achter het bureau ontwikkeld en daarna gefabriceerd was zonder dat men zich van de applicatie rekenschap had gegeven.

Van de 102 fouten zijn er 32 te wijten aan draadbreuk, welke men had kunnen voorkomen door dierproeven, ten einde zich op de hoogte te stellen van de mechanische krachten die binnen het lichaam optreden op de draden die naar de elektroden vlak bij het hart moeten lopen. Dit voorbeeld staat niet alleen; in het verleden zijn wij vaak door schade en schande (een beetje) wijzer geworden.

In de Tweede Wereldoorlog werkte bijv. 70% van de radarapparatuur niet. MTBF's (Mean Times Between Failures) van 1,5 uur zijn bij straaljagers voorgekomen. Er zijn voorbeelden bekend dat het onderhoud van apparatuur 10 × zoveel heeft gekost als de aanschafwaarde. En dan na te gaan dat het accent bij aankoop van apparatuur vaak heeft gelegen op de enkele procenten korting!

Bij steeds meer fabrieken komt het accent nu te liggen op de levensduurvoorspelling m.a.w. de 0-uur meting is belangrijk; dit is echter onvoldoende en een inzicht in het gedrag van het onderdeel of de apparatuur onder werkomstandigheden is noodzakelijk geworden.

Rekenvoorbeeld

Stel dat u voor een apparaat een gemiddelde tijd zonder storing eist van 10 000 uur (ongeveer 1 jaar) dan betekent dit een failure rate $\lambda_{app.}$ van 10^{-4}. Wanneer 1 000 onderdelen per apparaat worden ingebouwd is per onderdeel een failure rate nodig van $\lambda_{ond.} = 10^{-4} \times 10^{-3} = 10^{-7}$, waarbij wordt aangenomen dat alle onderdelen even bedrijfszeker zijn. De bedrijfszekerheid van dit apparaat in een periode van 1 000 h is dan $R = e^{-t/T} = e^{-1\,000/10\,000} = e^{-1/10} = 0{,}9048$ d.w.z. dat het apparaat 10% kans heeft op een storing binnen 1 000 h. $\lambda_{ond.} = 10^{-7}$ betekent een straffe eis aan het onderdeel onder normale gebruikscondities.

In vele apparaten is een groter aantal onderdelen toegepast hetgeen ook weer een hogere eis voor de bedrijfszekerheid van het onderdeel betekent. In de praktijk zijn de failure rates van verschillende onderdelen niet dezelfde. Per onderdeel moet de failure rate van tevoren worden bepaald, ten einde de MTBF

[1]) Voordracht gehouden voor het NERG op 22 juni 1967 te Utrecht. Manuscript ontvangen op 17 januari 1968.

[2]) Zie *De Ingenieur* 1967, nr. 22, blz. A 335.

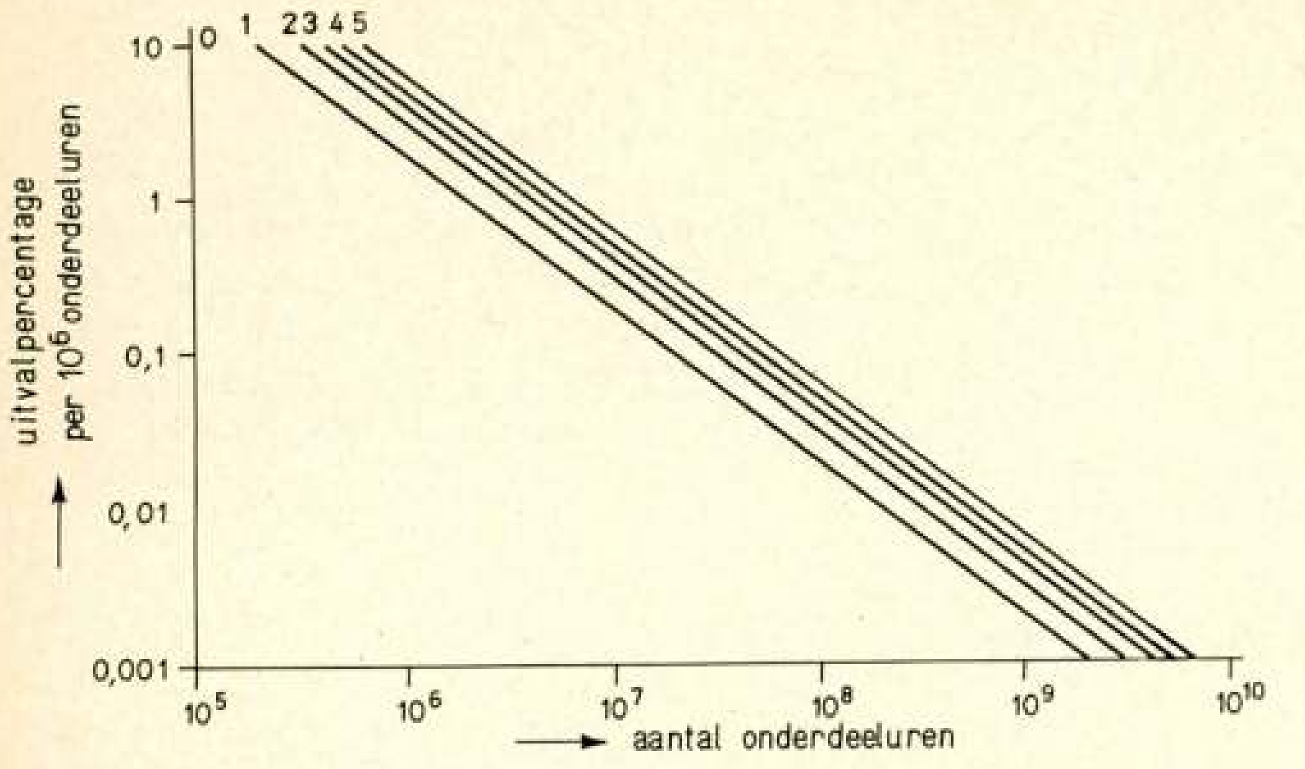


Fig. 1. Uitvalpercentage met 60% betrouwbaarheid versus het aantal onderdeeluren voor verschillende aantallen gevonden uitvallers.

van het apparaat te kunnen voorspellen. Uit fig. 1 blijkt, dat bijzonder grote aantallen onderdeeluren nodig zijn om tot een enigszins betrouwbare voorspelling van deze lage failure rates te komen.

Bedrijfszekerheid

Onder de bedrijfszekerheid van een apparaat of onderdeel verstaat men de waarschijnlijkheid dat het betreffende onderdeel of apparaat gedurende een bepaalde periode onder bepaalde condities op de juiste wijze zal functioneren. Er kan geen exact getal aan toegekend worden aangezien zij sterk afhangt van het gebruik van het onderdeel of apparaat en dus sterk kan worden beïnvloed door de gebruiker; een 'bedrijfszeker' onderdeel kan aanleiding geven tot storing in een apparaat wanneer het er onzorgvuldig in gemonteerd is.

Een toelichting op de bedrijfszekerheid wordt gegeven in fig. 2. Langs de abscis is uitgezet een omgevingsconditie, i.c. de temperatuur en langs de ordinaat de frequentie waarmee deze voorkomt, bijv. gedurende de gehele levensduur van het onderdeel. Tevens is uitgezet langs de abscis de maximale temperatuur die een onderdeel gedurende zijn levensduur kan doorstaan. Voor het gemak zijn hier twee normale frequentieverdelingen genomen. Het is duidelijk, dat de gemiddelde omgevingstemperatuur T_1 het meeste voorkomt en dat afwijkingen naar hogere en lagere temperaturen hier steeds zeldzamer optreden bij de

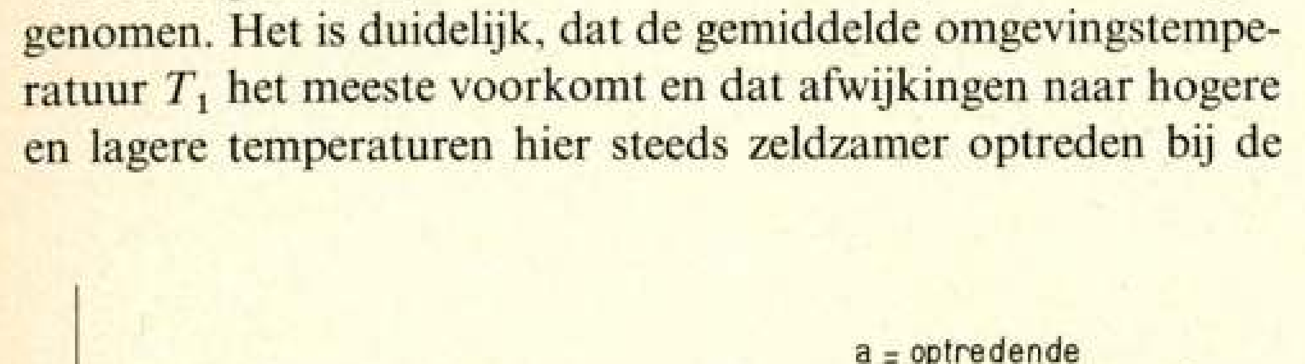


Fig. 2. Verdelingsdichtheid van de optredende omgevingstemperatuur en van de maximale omgevingstemperatuur, die het onderdeel kan doorstaan.

omgevingscondities. De meeste produkten kunnen als maximumtemperatuur T_4 doorstaan. Afhankelijk van de spreiding om T_4 zullen een aantal produkten slechts maximumtemperaturen kunnen doorstaan die lager zijn dan T_4 maar ook lager dan de maximaal optredende omgevingstemperatuur T_3. Het gebied van bedrijfsonzekerheid ligt dus tussen de temperaturen T_2 en T_3.

Om nu de bedrijfszekerheid van het onderdeel te verhogen zien wij 4 mogelijkheden, nl.:

1. Door de gemiddelde kwaliteit van het onderdeel te verhogen, bijv. door betere materialen te gebruiken, betere technologieën toe te passen, ruimer te dimensioneren, enz. In het algemeen gaat dit met meer kosten gepaard.
2. Door een beter beheerst produkt te maken, d.w.z. produkten met een kleinere spreiding in de eigenschappen bij dezelfde gemiddelde kwaliteit.

Het is duidelijk dat bij beide oplossingen geen of een veel kleiner gebied van bedrijfsonzekerheid zal ontstaan.

3. Wij kunnen ook de andere kant uit werken, d.w.z. door mildere omgevingscondities te realiseren, bijv. door koeling van ruimten, waarin hoge temperaturen kunnen voorkomen.
4. Het beter beheersen van de omgevingscondities, d.w.z. in ons voorbeeld het verminderen van de fluctuaties in de temperatuur. Dit kan geschieden door een conditionering van het apparaat waarin het onderdeel wordt toegepast, of van de ruimte waarin het apparaat wordt geplaatst.

De laatste twee oplossingen die eigenlijk bij de apparatenbouwers thuishoren, worden ook door Icoma toegepast in de subassemblies en in de geheugens. De omhulling van de bouwstenen zorgt ervoor dat de omgevingscondities worden verzacht, trillingen en schokken worden door de massa, welke de onderdelen in de bouwstenen omgeeft, opgevangen. De toptemperatuur van het onderdeel wordt door de warmtegeleidende massa verminderd. Vocht en corrosieve damp worden door de dichtgesoldeerde doosjes buiten gehouden. Een geforceerde koeling van de geheugens zorgt voor een vermindering van de maximum temperatuur en dus ook voor een verlaging van de gemiddelde temperatuur.

Bedrijfszekerheid als functie van de tijd

Vaak vindt men deze geïdealiseerde afbeelding zonder schaalaanduiding, die ook hier consequent is weggelaten. De vorm van deze curve is sterk afhankelijk van de belasting waaraan het onderdeel wordt onderworpen. In vele gevallen is de curve anders van vorm dan hier weergegeven. Voor sommige onderdelen wordt de opvatting gehuldigd, dat de geïdealiseerde zgn. badkuipcurve een goed recept is voor een kwaal die niet voorkomt.

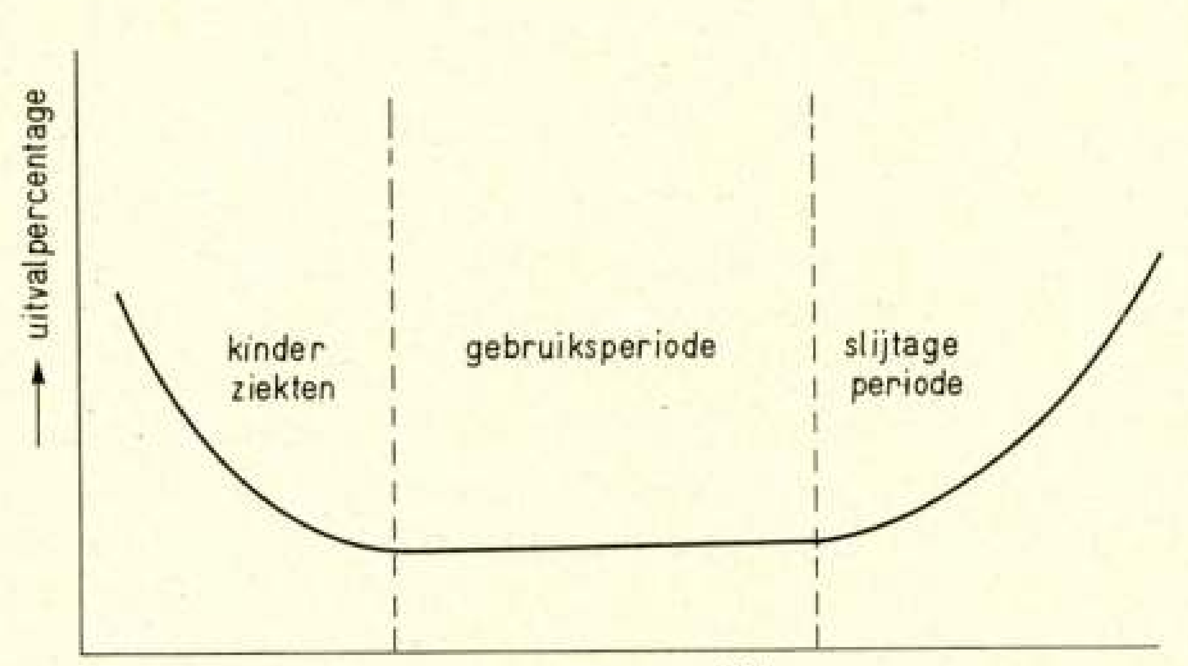


Fig. 3. Badkuipcurve.

Vooral het horizontale deel van de curve wordt zelden aangetroffen. Soms blijft de curve dalen tijdens de gebruiksperiode, hetgeen prettig is, soms ligt het minimum van de curve voor in de gebruiksperiode. In beide gevallen mag slechts een klein deel van de curve horizontaal lopend worden verondersteld.

Slijtageperiode

Wanneer de kans op uitval in de tijd gezien te snel stijgt zijn de volgende maatregelen mogelijk:

1. Een preventieve vervanging van het onderdeel. Dit is de reden, dat indertijd buishouders voor buizen zijn ontwikkeld. Men kan zich afvragen of de tijd niet is gekomen om buizen, net als andere onderdelen, direct op de prentplaat te solderen. De prijsverlaging zou men kunnen benutten voor verbetering van de bedrijfszekerheid van de buizen, of voor het milder maken van de gebruikscondities van de buizen, bijv. door het egaliseren van de gloeispanning.
2. Verbetering van het ontwerp van het onderdeel.
3. Betere beheersing van de fabricage, waardoor de gebruiksperiode kan worden verlengd.
4. Verzachting van de omgevingscondities (airconditioning, afscherming, derating, redundancy in ontwerp door toepassing van parallel trappen).
5. Toepassing van een ander, mogelijk duurder onderdeel dat minder nazorg geeft. Als voorbeeld noem ik hier het toepassen van een grotere, 2 cent duurdere weerstand in een circuit van een apparaat, waardoor 3 cent op nazorg werd bespaard.

Kinderziekten

Wanneer kinderziekten in aanzienlijke mate voorkomen, is het noodzakelijk, de oorzaken ervan op te sporen. Deze oorzaken kunnen triviale handelingen in het fabricage-proces zijn, die kunnen worden opgelost door betere discipline in de fabriek, of door het fabricagevoorschrift te veranderen. Het kunnen verouderingsverschijnselen zijn, waarmee rekening kan worden gehouden als het een verloop in één richting is, bijv. bij verhoging van de weerstandswaarden. In zulke gevallen is het een goede oplossing een inbrandperiode bij de fabrikant in te voeren, zodat de afnemer geen narigheid van deze kinderziekte ondervindt. Wel moet men ervoor oppassen, gedurende de inbrandperiode, die vaak onder verzwaarde condities plaatsvindt, twijfelachtige onderdelen in levensduurgedrag niet slechter te maken. Berekend voor een bepaald apparaat kost het inbranden, met 10% overspanning gedurende 3 uur, 55 cent per apparaat waarbij aan nazorgkosten *f* 1,80 per apparaat wordt bespaard, zodat het inbranden in dit speciale geval een voordeel van *f* 1,25 per apparaat oplevert.

Ook is het moeilijk voor één familie van produkten één en dezelfde levensduurcurve te geven. Er kunnen sterke afhankelijkheden van de constructie optreden, laagdikten enz. De failure rate bijv. van opgedampte hoog-ohmige weerstanden is hoger dan die van lagere weerstandswaarden aangezien de koollaagdikte kritisch is bij hoge weerstandswaarden. Hogere weerstandswaarden kunnen dan ook beter worden verkregen, wanneer men beperkt is in het volume van de weerstand, door gebruik te maken van suspensies met een hogere soortelijke weerstand en dus ook grotere laagdikten. Voor condensatoren geldt in het algemeen, dat de failure rate stijgt met de capaciteitswaarden, o.a. door het toenemen van de kans op een onregelmatigheid in de grotere oppervlakken van het diëlektricum en de elektroden. Dit is ook te lezen in het MIL-handboek 217, waarin de failure rate is gegeven afhankelijk van de belasting, temperatuur, weerstandswaarden en afmeting.

Enkele jaren geleden schatte een O.E.C.D.-Commissie [3]), dat per jaar aan het verzamelen van bedrijfszekerheidsgegevens in de O.E.C.D.-landen ca. *f* 700 000 000,— wordt uitgegeven, terwijl de resultaten voor het merendeel niet onderling worden uitgewisseld. Het is bepaald deprimerend zich te realiseren, dat op zovele plaatsen dezelfde onderdelen ongecoördineerd worden gemeten; soms geschiedt dit onder vergelijkbare omstandigheden, soms onder totaal verschillende. De eerstgenoemde resultaten zijn vergelijkbaar, de laatste kunnen aanvullend zijn en zijn vaak niet te vergelijken.

Als voorbeeld noem ik u het ongecoördineerde onderzoek naar bedrijfszekerheidsgegevens in het traject materiaal-leverancier tot en met de uiteindelijke gebruiker van een keramische condensator. Er worden duurproeven verricht aan het keramische buisje in de Materiaalgroep; duurproeven aan de keramische condensator in de Onderdelengroep; duurproeven aan complete t.v.-apparaten in de Apparatengroep, een ingangscontrole door middel van duurproeven bij zgn. Rentals en uiteindelijk duurproeven bij het gebruik in de huiskamer.

Het is duidelijk, dat een coördinatie tussen al die plaatsen waar duurproefcontroles plaatsvinden wenselijk is. Sedert kort wordt hier actief aan gewerkt. Door een betere afstemming kan dubbel werk worden voorkomen en kunnen de verschillende soorten van duurproeven in verband met elkaar worden gekozen, zodat een optimaal gebruik wordt gemaakt van de vaak zeer kostbare duurproefapparatuur. Van essentieel belang is een goede terugkoppeling via Service Rentals, of via afnemers van grote systemen, zoals PTT, aangezien het voorkomt, dat dure testapparatuur bij de leverancier moet worden gebruikt. De extra kosten, verbonden aan de terugkoppeling van de gegevens uit de praktijk, beperken zich in het algemeen tot administratieve en enkele organisatorische maatregelen, ten einde betrouwbare gegevens te verkrijgen. Ook zal het nodig zijn, dat de administratie zich in zoverre aanpast, dat op eenvoudige wijze de integrale financiële gegevens over een produkt worden verzameld.

Vroeger kwam het nogal eens voor, dat Service een soort van eigen leven leidde; wanneer er bijv. op een zeker moment veel reparaties werden verricht, waarvoor prijzen aanmerkelijk boven de kostprijs werden gevraagd, meende Service zich tevreden te moeten voelen met de situatie en zag geen noodzaak voor het melden van de omvang van de reparaties aan de betreffende apparatengroep.

Een goed voorbeeld van terugkoppeling van de PTT en de Telecommunicatie Industrie naar de toe-leverancier van onderdelen wil ik u niet onthouden. Voordat anderen over het onderwerp Bedrijfszekerheid spraken gebeurde in de Telecommunicatie Industrie reeds veel in goed onderling overleg. Telecommunicatie-apparatuur is nu eenmaal gecompliceerd, verwerkt veel onderdelen op sleutelposities (2700 kanalen over één onderdeel) en men kan daardoor de gegevens van reparaties onder eigen beheer doelmatig terugkoppelen naar de leverancier. Als een goed voorbeeld van zo'n terugkoppeling noem ik u de gegevens over de onderdelen-uitval van een centrale gedurende een jaar van gebruik. Het bleek, dat 240 koolweerstanden waren uitgevallen in de loop van een jaar bij een totaal van 1 200 000 weerstanden in gebruik, dus een uitvalsfrequentie van ca. 24×10^{-9}. Dit getal werd te hoog gevonden.

Een nadere analyse vond plaats, waarbij de uitgevallen weerstanden een nummer kregen overeenkomend met de plaats van

[3]) O.E.C.D. = Organization for Economic Cooperation and Development.

de weerstanden in het circuit van de kanaallade. Het bleek, dat 165 weerstanden op dezelfde plaats in het circuit waren uitgevallen ten gevolge van te traag werkende zekeringen. Van de overige 75 stuks waren er 16 uitgevallen, doordat een bepaalde mica-condensator was doorgeslagen. Van de resterende 59 stuks bleken 30 ex. te zijn uitgevallen doordat een 1/8 W weerstand was ingebouwd in plaats van een 1/4 W weerstand. Van de overblijvende 29 stuks uitval kon niet zonder meer de oorzaak worden gevonden. Deze werden aan een nauwkeurige failure-analyse onderworpen, waarbij fouten in materiaal (o.a. groefjes in de keramiek) en in technologie (o.a. loszittende dopjes) aan het licht kwamen. De 1/8 W weerstand was abusievelijk ingebouwd omdat deze waarde foutief op een gewijzigd fabricagevoorschrift voorkwam. Alle kanaalladen behept met deze fout konden worden vervangen. Er werden snellere zekeringen toegepast in alle kanaalladen en de mica-condensatoren werden aan een speciaal onderzoek onderworpen. Het bleek, dat er vijf overgangscontacten in voorkwamen die tot storingen aanleiding gaven. In het nieuwe ontwerp voor mica-condensatoren komen nog slechts twee overgangscontacten voor.

Uit dit onderzoek moge blijken, dat zowel de PTT als de leveranciers van de apparaten alsmede de leveranciers van de onderdelen sterk gebaat zijn bij goede terugkoppeling van gebruiksgegevens.

Het accent van het werk van de kwaliteitslaboratoria komt duidelijk te liggen op de terugkoppeling en het opsporen van het failure-mechanisme ten einde de bedrijfszekerheid te kunnen voorspellen, de zgn. 0-uur keuring verliest aan gewicht. Enkele apparaten, die voor het opsporen van failure-oorzaken frequent worden gebruikt zijn de microscoop (ten einde onvolkomenheden in materiaal en constructie, zoals insluitsels, groeven, scheuren, onreinheden en 'whisker'groei te ontdekken), apparatuur voor infraroodmetingen (wordt voornamelijk gebruikt om onvolkomenheden in constructies te analyseren, bijv. de afstand tussen windingen van een draadgewonden weerstand en ook de doorsnede van een draadgewonden weerstand) en de harmonische meter (opsporen van instabiele contactweerstanden).

Uit de praktijk is ons gebleken, dat de openhartige contacten tussen de onderdelenfabrikant en de apparatenbouwer van onschatbaar belang zijn om tot optimale kwaliteiten te komen. Wanneer men bijv. in een nieuw-ontworpen circuit een nieuw onderdeel wil gebruiken, dan treedt men in overleg met de fabrikant, die men zijn wensspecificatie voorlegt. De fabrikant geeft zijn commentaar op deze specificatie en na overleg kan verandering in de wensspecificatie hiervan het gevolg zijn. Men stelt dan gezamenlijk de 'target'-specificatie op, waarna de ontwerper gaat beginnen. Vaak gebeurt het, dat uit de proeffabricage is af te leiden, dat een hogere produktie-opbrengst mogelijk zou zijn wanneer enkele eigenschappen anders gespecificeerd zouden worden. In zo'n geval vindt er hernieuwd overleg plaats over de specificatiewijziging tussen de apparatenbouwer en de onderdelenleverancier, welk contact een definitieve specificatie tot gevolg heeft.

Tijdens de produktie kan het gebeuren, dat de afnemer bemerkt, dat hij enkele additionele eisen moet specificeren of dat het onderdeel veel beter blijkt te zijn dan de specificatie aangeeft. Een nieuw gesprek vindt dan plaats, waarbij het onderdeel anders wordt gespecificeerd en/of het circuit wordt veranderd.

Het is onze ervaring, dat pas na afloop van de definitieve produktie kan worden bepaald, wat de optimale specificatie is van het onderdeel voor een bepaalde applicatie.

Een voorbeeld kan ik geven, dat betrekking heeft op de optimale uitvalsgarantie van geheugenringen in verband met de toepassing in geheugenpanelen. Het is mogelijk, uit een bestaande produktie te berekenen wat de kosten zijn in relatie met de gemiddelde doorgeleverde kwaliteit, afhankelijk van het gebruik van verschillende keuringssystemen. Ook is het mogelijk schadekosten in de panelen van foutieve geheugenringen te bepalen.

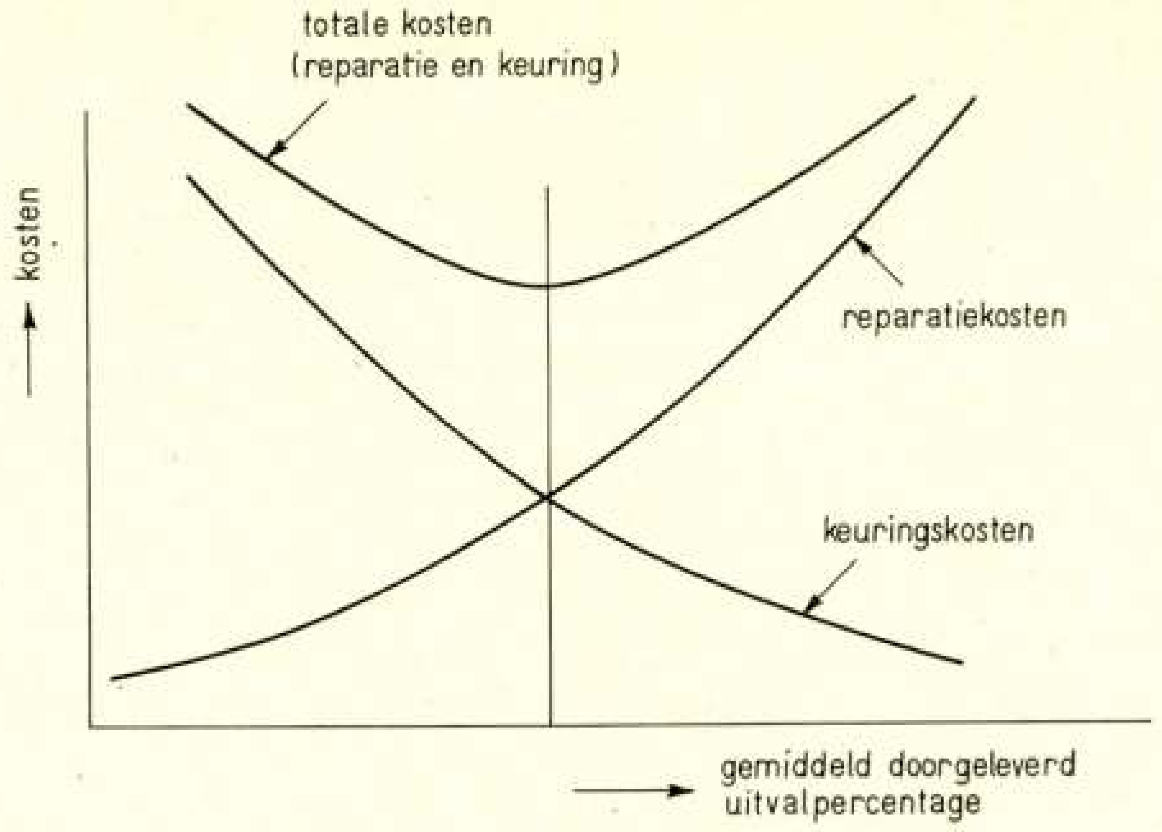


Fig. 4. Kosten als functie van het gemiddeld doorgeleverd uitvalpercentage.

Met behulp van een grafiek als gegeven in fig. 4 met als abscis de gemiddelde doorgeleverde uitval en als ordinaat de kosten is het minimum van de som van keurings- en reparatiekosten te bepalen. Een dergelijke integrale aanpak van kwalitatieve en relatieve problemen tussen afnemer en leverancier blijkt zo logisch, dat het verbazingwekkend is te moeten constateren, dat hier in het verleden zo zelden gebruik van is gemaakt.

Een laatste punt, dat ik wil toelichten, is het verzamelen en het verspreiden van bedrijfszekerheidsgegevens. Op een gegeven moment zijn wij de beschikbare duurproefgegevens, welke voor het merendeel in de kasten lagen opgeslagen, gaan analyseren. Het bleek na enige selectie mogelijk, ze in gecomprimeerde vorm ter beschikking van de apparatenbouwer te stellen. Na enig overleg werden wij het eens over de vorm waarin en de frequentie waarmee deze gegevens zouden worden verspreid. Een groep statistici houdt zich bezig met het verzamelen, het bewerken en het analyseren van deze gegevens. Ook heeft deze groep een computerprogramma opgesteld, waarmede de automatisch gemeten en geponste gegevens van de onderdelen tot bruikbare getallen voor stabiliteit, uitvalfrequentie enz. worden omgevormd.

Hiernaast worden steeds meer gegevens systematisch uit de praktijk verzameld. Alle gegevens werken ertoe mee een inzicht te verkrijgen in de kwaliteitspunten van het onderdeel; screeningtests worden speciaal ontwikkeld ten einde foutieve soorten te voorkomen. Alhoewel deze screening-tests, welke vaak gebaseerd zijn op veel ervaring en gericht speurwerk en die als zodanig als geestelijk eigendom van de leverancier moeten worden gezien, niet door ons bekend worden gemaakt, wil ik er enkele noemen om een indruk te geven. Weerstanden worden bijv. gemeten bij een hoge relatieve vochtigheid en bij een spanning waarbij geen eigen verwarming en dus geen uitdroging optreedt, maar waarbij wel ionisatie kan optreden. Geïmpregneerde condensatoren worden onder spanning op een zo hoge temperatuur getest, dat in een niet elastische impregneermassa krimpholten ontstaan, waarin ionisatie kan optreden.

Nieuwe systemen van inspectie zoals het CEPEC/CEMAC voorstel in Europa, het Burghard-systeem in Engeland, het systeem CCT in Frankrijk, alsmede het Amerikaanse MIL-systeem heb ik met het oog op de beschikbare tijd niet behandeld.

Air and space borne computers

Verslag bijeenkomst A.G.A.R.D. 4-5 juni 1968 te Amsterdam

Op 4 en 5 juni jl. werd in het Nationaal Lucht- en Ruimtevaart Laboratorium te Amsterdam de 31e A.G.A.R.D.-voordrachtenserie onder de titel 'Air and space borne computers' gehouden.

De A.G.A.R.D., afkorting van Advisory Group for Aerospace Research and Development, werd in 1954 door de NAVO-partners opgericht. Het doel van deze groep is het mobiliseren van het wetenschappelijke en technische potentieel van de NAVO-partners op het gebied van de lucht- en ruimtevaart. Zij heeft dit doel in de afgelopen jaren trachten te verwezenlijken door het organiseren van een groot aantal conferenties en voordrachtenseries en door het daadwerkelijk meehelpen aan het tot stand komen van uitwisseling van wetenschapsmensen en van technische informatie.

De 31e voordrachtenserie, die behalve in Amsterdam ook in Farnborough (U.K.) en in Bologna (Italië) werd gehouden, belichtte de verschillende facetten van rekenmachinesystemen die aan boord van vliegtuigen of van ruimtevoertuigen worden toegepast.

De voordrachten werden bijgewoond door ongeveer 75 wetenschapsmensen waarvan het overgrote deel (63) uit Nederland afkomstig was. Hieronder volgt een opsomming van de titels van de in het totaal 12 voordrachten:

1. Opening remarks: E. Keonjian, Chief Microelectronics and Circuit Design, Grumman Aircraft Corporation, U.S.
2. Impact of computers on overall design: P. B. Rayner, Manager Airborne Computing Division, Elliott Brothers, (London) Ltd., U.K.
3. Techniques for developing optimum man-computer relationship: W. M. Gaddes, Manager Human Factors, Federal System Division, IBM, U.S.
4. System engineering implications of microprogramming: W. J. Patzer, Manager System Architecture, Federal System Division, IBM, U.S.
5. Structure of an aerospace computer family: W. J. Patzer.
6. Design criteria to meet the environmental conditions: E. Kanter, vice-president Advanced Systems, Teledyne Company, U.S.
7. Design trade-offs and special considerations: J. Chinal, Directeur des Etudes, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique, France.
8. Modular computer system architecture: Dr. J. Weissman, Data Systems Division, Autonetics, North American Rockwell Corporation, U.S.
9. New memories and storage techniques: Dr. L. M. Spandorfer, Director Technology Planning, UNIVAC Division, Sperry Rand Corporation, U.S.
10. Optimum packaging approaches: Dr. R. F. Redemske, Director of Engineering, Teledyne Company, U.S.
11. Special aids and new computing devices: P. B. Rayner.
12. Large Scale Integration: Dr. L. M. Spandorfer.

De voordrachtenserie werd besloten met een 'panel'-discussie.

Over het geheel genomen was de inhoud van de voordrachten nogal teleurstellend, hetgeen wellicht de verklaring is voor het wegblijven van vele deelnemers op de tweede dag. Men bleek duidelijk teleurgesteld in de hoop iets nieuws te kunnen leren. Daarbij komt bovendien dat de wijze van voordragen, indien tenminste het op ongeïnteresseerde toon voorlezen van de tekst voordragen genoemd mag worden, van sommige sprekers beneden peil was. Dat dit beslist wel anders kan werd bijvoorbeeld bewezen tijdens de twee jaar geleden gehouden 22e lezingenserie van A.G.A.R.D. in de T.H. te Delft over het onderwerp 'The application of microelectronics to aerospace equipment'. Bovendien was de T.H.-accommodatie voor dit doel veel beter geschikt.

Het ligt in de bedoeling dat de teksten van de voordrachten en de 'panel'-discussie in gedrukte vorm zullen verschijnen. Gezien het feit dat de praktijk heeft geleerd dat met de voorbereiding hiervan zeer lange tijd is gemoeid, worden hier van de lezingen genoemd onder de punten 6, 9 en 12, die naar de mening van de redactie-commissie het meest interessant waren, uittreksels gegeven.

Design criteria to meet the environmental conditions (*E. Kanter*)

De huidige digitale rekenmachines die in vliegtuigen en ruimtevaartuigen worden toegepast hebben tekortkomingen op het gebied van betrouwbaarheid, flexibiliteit en onderhoud. Zij zijn over het algemeen zeer kwetsbaar: het uitvallen van één element op een kritische plaats veroorzaakt veelal het uitvallen van de gehele rekenmachine. Het in bedrijf houden van een dergelijk systeem vereist niet alleen ervaren en goed opgeleid personeel maar ook een aanzienlijke hoeveelheid test- en onderhoudsapparatuur. Het is duidelijk dat genoemde factoren een ongunstige invloed op de betrouwbaarheid zullen hebben.

De vraag kan worden gesteld of hier wat aan valt te veranderen. De spreker gaf toe dat de huidige stand van de technologie beperkingen oplegt. Maar desondanks zouden de hiervoor gesignaleerde tekortkomingen aanzienlijk kunnen worden verminderd indien er meer aandacht aan het ontwerp van een systeem zou worden besteed.

Men dient hierbij uit te gaan van de volgende eisen:

1. De apparatuur zelf (dus niet de programmatuur) dient in staat te zijn het falen van een eenheid op een kritische plaats te detecteren. In de huidige machines worden de diagnostische procedures meestal geheel door de programmatuur uitgevoerd. Een goed werken van de elementaire delen van de rekenmachine is hiervoor een eerste vereiste.
2. De apparatuur dient opgebouwd te worden uit eenheden die gemakkelijk te vervangen zijn. Door de apparatuur moet de eenheid aangewezen worden die de oorzaak van een storing is.
3. Het systeem moet de mogelijkheid bezitten, ook wanneer een aantal eenheden door storing is uitgevallen, de continuïteit van de rekenfuncties met de hoogste prioriteit te kunnen waarborgen. Hiertoe zullen de eenheden dienen te worden gehergroepeerd waarbij elementen, die aan functies met lagere prioriteit waren toegewezen, aan deze functies worden onttrokken en voor het herstellen van de belangrijke functies worden gebruikt.
4. De apparatuur dient te worden opgebouwd uit zoveel mogelijk identieke, gemakkelijk te vervangen, gestandaardiseerde eenheden. Voor het lokaliseren van de fout in een dergelijke eenheid mag geen extra apparatuur of gereedschap benodigd zijn.

Na het opsommen van deze eisen ging de spreker wat dieper in op de omgevingscondities waaraan de apparatuur wordt blootgesteld. Hij merkte daarbij op dat deze condities alle zeer goed bekend en vastgelegd zijn. De ontwerper bezit twee instrumenten

waarmee hij kan trachten het systeem zo goed mogelijk bestand te maken tegen ongunstige invloeden van buitenaf, te weten het ontwerp van de logische organisatie en het ontwerp van de apparatuuropbouw. Men dient zich bij het ontwerpen niet al te zeer te baseren op methoden en technieken, die algemeen als geavanceerd worden beschouwd.

Het toepassen van microcircuits wordt bijvoorbeeld tegenwoordig als een moderne geavanceerde techniek beschouwd. In wezen verandert men echter weinig aan een systeem wanneer men louter en alleen de discrete elementen vervangt door microcircuits. Pas wanneer men van het eerste begin van de opzet van een systeem af voortdurend tracht de potentiële mogelijkheden van dergelijke circuits in het ontwerp te realiseren kan men met recht van een geavanceerde techniek spreken.

Microcircuits zijn, uit logisch standpunt gezien, in principe gelijk aan de bekende flip-flops, poortschakelingen e.d., zij het in een aanzienlijk kleinere en lichtere uitvoering. Alleen al bij het streven naar het uitbuiten van de kleine afmetingen stuit men op een aantal moeilijkheden.

1. De dissipatie maakt het onmogelijk de microcircuits dicht bij elkaar te plaatsen.
2. Zelfs als dit voorgaande probleem opgelost was vormt de dan optredende dichtheid van de verbindingen onoplosbare moeilijkheden.
3. Bij grote dichtheid van de microcircuits wordt het testen van de schakelingen zeer moeilijk.

Gesteld dat deze mechanische problemen zouden zijn opgelost, dan zou een dergelijk systeem voor wat betreft flexibiliteit, groeivermogen en logistiek van de reserve-onderdelen nog maar weinig verschillen van de huidige apparatuur.

De ontwerper van microcircuitsystemen dient zich te realiseren dat de traditionele regels niet langer gelden. Niet alleen is het bijvoorbeeld weinig zinvol meer om ernaar te streven een bepaalde logische functie te realiseren met zo min mogelijk logische circuits; het plaatsen van één enkele poortschakeling op een ongunstige plaats kan een aanzienlijke verhoging van de kosten met zich meebrengen. Men dient daarom bij het ontwerp uit te gaan van functionele elementen (zoals een vermenigvuldiger, een deler, een integrator e.d.) in plaats van uit te gaan van aparte logische circuits (flip-flops, poortschakeling e.d.). De op dit moment bestaande LSI-circuits kunnen als zulke functionele elementen worden beschouwd.

Uitgaande van een aantal functionele elementen (integrator, differentiator, opteller, aftrekker, vermenigvuldiger, deler en servo-eenheid) demonstreerde de spreker vervolgens hoe een gegeven mathematische vergelijking met behulp van deze functionele elementen opgelost kan worden. Het resultaat is een stroomschema dat zeer veel lijkt op het schema dat men zou verkrijgen, indien het probleem met behulp van een analoge rekenmachine zou worden opgelost.

Het blijkt dat de wiskundige bewerkingen, die in 'on-board'-systemen in de lucht- en ruimtevaart worden toegepast, in het algemeen een opvallende gelijkenis vertonen. Hierdoor is het mogelijk moduuls samen te stellen, die opgebouwd zijn uit een vaste combinatie van functionele elementen (bijvoorbeeld 10 optellers, 10 vermenigvuldigers, 1 deler enz.). Voor het realiseren van een bepaalde mathematische functie neemt men dan eenvoudig evenveel identieke moduuls als men nodig heeft. De moduuls worden in pluggen gestoken. De verbindingen van de pluggen onderling worden tot stand gebracht door middel van een verbindingsmatrix.

Op strategische plaatsen tussen de functionele elementen zijn in de moduul poortschakelingen opgenomen. Door telkens een andere combinatie van stuurspanningen voor deze poorten te kiezen kan de topologie van de functionele elementen binnen een moduul gevarieerd worden. Het realiseren van een mathematische functie komt er dus in wezen op neer dat door middel van de poortspanningen de gewenste combinatie van functionele elementen binnen elke moduul gekozen wordt.

Behalve het voordeel dat de gehele rekenmachine opgebouwd is uit identieke moduuls, biedt dit systeem de mogelijkheid om door het variëren van het patroon van de poortspanningen bij het uitvallen van moduuls in functies met hoge prioriteit moduuls aan andere, minder belangrijke functies te onttrekken en toe te wijzen aan de gestoorde functie. De spreker duidde dit aan met de term 'configuration control'.

Het probleem van het detecteren en lokaliseren van fouten door de apparatuur zelf kan op meerdere wijzen worden opgelost. De spreker noemde als mogelijke oplossing het toepassen van drie identieke, parallel geschakelde rekensystemen. Op verstandige plaatsen in de systemen, bijvoorbeeld steeds tussen opeenvolgende moduuls, worden meerderheidslogica-schakelingen aangebracht. Elk van de drie systemen heeft dergelijke schakelingen op overeenkomstige plaatsen.

Behalve de output van het voorafgaande eigen moduul wordt aan een dergelijke poortschakeling de output van de twee parallel geschakelde identieke moduuls toegevoerd. De output van de poortschakeling is steeds gelijk aan de meerderheid van de inputs. De meerderheids-output wordt vergeleken met de output van de eigen voorafgaande moduul. Indien er een verschil wordt geconstateerd mag geconcludeerd worden dat met grote waarschijnlijkheid de eigen moduul niet goed functioneert. In dat geval wordt een mechanische foutsignalering geactiveerd op de betreffende moduul.

Op identieke wijze kan in de machine een testvoorziening worden opgenomen waarmee een goed functionerend moduul kan worden vergeleken met een moduul, waarvan men het vermoeden heeft dat het niet correct werkt.

Concluderend mag worden gesteld dat een machine opgebouwd volgens het hier geschetste concept voldoet aan de eerder genoemde eisen.

Tot slot deelde de spreker mede dat er reeds machines volgens dit principe zijn gebouwd, zij het dat door een aantal beperkingen in de huidige technologie het volledig realiseren van dit concept nog niet mogelijk is gebleken. Hij verwachtte echter dat in de nabije toekomst dergelijke rekensystemen op grote schaal in de lucht- en ruimtevaart zullen worden toegepast.

New memory and storage techniques (*Dr. L. M. Spandorfer*)

Hoewel de magnetische-filmgeheugens en de halfgeleidergeheugens sterk aan het opkomen zijn is en blijft volgens de spreker de ferrietring toch het belangrijkste geheugenelement. Nog steeds wordt er aanzienlijke vooruitgang geboekt met de ontwikkeling van ferrietringgeheugens. Spreker noemde ringgeheugens met cyclustijden in de grootte-orde van 750 ns terwijl experimentele toepassing van miniatuur-ferrietringen reeds cyclustijden van 110 ns heeft opgeleverd. Voor geheugens van zeer beperkte afmetingen ('scratch pad memories') worden reeds tijden van 80 ns genoemd.

Hoewel er enkele voorbeelden zijn te noemen van systemen waarin de 'plated wire'-geheugens worden toegepast (UNIVAC 9000 computerserie) is de opmars van de nieuwe magnetische-geheugentechnieken minder snel dan werd verwacht. Volgens de spreker is dit niet zozeer te wijten aan het niet kunnen halen van de beoogde eigenschappen als wel aan de economische facetten van de fabricage. De nieuwe geheugentechnieken hebben alle één ding gemeen: een groot aantal geheugenelementen dient

tegelijkertijd op één substraat te worden gefabriceerd. Dit betekent echter dat de 'yield' praktisch 100% dient te zijn. Voor de halfgeleidergeheugens komt daar bovendien als beperkende factor het grote aantal interne verbindingen bij.

De verwachting is desondanks dat de nieuwe geheugentechnieken wel degelijk toegepast zullen worden. Namelijk daar waar cyclustijden vereist worden welke aan de grens liggen van de met ferrietringen bereikbare tijden (zeer snelle geheugens van middelmatig tot zeer grote afmetingen). Speciaal voor halfgeleidergeheugenelementen ligt een toepassingsgebied waarbij kleine buffergeheugens gebruikt worden: de kosten van deze geheugenelementen zullen in dat geval lager zijn dan die van ferrietringgeheugens, daar de kosten van de besturingscircuits voor deze laatste soort relatief hoog zullen zijn.

Magnetische-filmgeheugens zijn in te delen in geheugens met een vlakke basisconfiguratie (planar structures) en in geheugens met een cilindrische basisconfiguratie (cylindrical structures) zoals 'plated wire'.

Beide soorten zijn voor wat betreft impedantieniveaus, stuurstromen, schakeltijden en aantal bits per volume-eenheid ruwweg equivalent. Dat de 'plated wire'-geheugens reeds in aanzienlijke hoeveelheden worden geproduceerd in tegenstelling tot de vlakke-filmgeheugens vindt voor een groot deel zijn oorzaak in de moeilijkere fabricagetechnieken die voor laatstgenoemde soort toegepast moeten worden.

Een 'plated wire'-geheugenmatrix wordt opgebouwd uit parallel lopende ϕ 5 mil geleiders (bit lines) die geheel bedekt zijn met een dunne laag magnetisch materiaal. Loodrecht hierop worden aan onder- en bovenzijde koperen geleiders (word lines) aangebracht. Een bit bevindt zich op de kruising van bit- en woordlijn. Per inch 'plated wire' kunnen op deze wijze ongeveer 20 bits opgeslagen worden. Het uitgangssignaal is in de grootte-orde van 5-10 mV, hetgeen lager is dan van ferrietringgeheugens (20-30 mV) maar hoger dan van vlakke-filmgeheugens (1 mV). Het reeds eerder genoemde computersysteem 9000 van UNIVAC heeft een 'plated wire'-geheugen met een cyclustijd van 600 ns (8 bit byte). De verwachting is dat in de nabije toekomst cyclustijden van 100 ns haalbaar zullen zijn.

Daar bij vlakke-filmgeheugens het magnetisch materiaal door middel van maskers wordt aangebracht, kan indien tevens de techniek van gesloten fluxpaden wordt toegepast een bitdichtheid van 10^4 bits/inch^2 gerealiseerd worden (plated wire: 10^3 bits/inch^2).

Enkele voorbeelden van bestaande vlakke-filmgeheugens:
16K 52 bitwoorden: cyclustijd 500 ns;
4K 68 bitwoorden: cyclustijd 200 ns;
8K 72 bitwoorden: cyclustijd 125 ns.

De regelmatige opbouw van geheugens leent zich bijzonder goed voor het toepassen van de LSI-techniek. Halfgeleidergeheugens worden op dit ogenblik in de zogenaamde 'scratch pad' geheugens al meer toegepast dan magnetische-filmgeheugens. Men verwacht dat de kosten per bit van LSI-geheugens in 1972 ongeveer 0,1 dollarcent zullen bedragen (zonder test- en verpakkingskosten).

Het voordeel van LSI-halfgeleidergeheugens ligt onder meer in het feit, dat de voor de besturing benodigde circuits op de 'chip' bij de geheugenelementen kunnen worden aangebracht. Op het ogenblik is er een 16 bit bit-georganiseerd halfgeleidergeheugen in de handel, uitgevoerd in de standaard 14 pin dual-in line verpakking. Het gedissipeerde vermogen bedraagt 250 mW, de toegangstijd bij een belasting van 30 pF bedraagt 20 ns.

Het toepassen van MOS-geheugenelementen levert ten opzichte van de toepassing van bipolaire elementen naast een grotere bitdichtheid als voordeel vooral een belangrijke vermindering van het gedissipeerde vermogen op (0,1 mW-geheugenelement).

De spreker noemde nog een ander experimenteel systeem voor de opbouw van halfgeleidergeheugens. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de zogenaamde 'beam lead bonding'-techniek, waarmee een zeer hoge bitdichtheid kan worden verkregen (1 bit/25 mil^2).

In de zogenaamde 'content addressable'-geheugens bieden halfgeleidergeheugenelementen een groot voordeel boven magnetische elementen. Eerstgenoemde kunnen namelijk behalve in de woord-parallelle mode ook op eenvoudige wijze in de voor deze techniek noodzakelijke bit-parallelle mode worden uitgelezen.

In dode geheugens (read-only) zullen de ferrietringen voorlopig wel blijven domineren. Immers, het vastleggen van een bitpatroon in een halfgeleidergeheugen dient te geschieden door het aanbrengen van een bepaald geleiderpatroon op de geheugenchip en kan derhalve niet door de gebruiker zelf uitgevoerd worden. Er zijn echter enige ontwikkelingen gerapporteerd die erop wijzen dat het toepassen van halfgeleider-'read-only'-geheugens tot de reële mogelijkheden zal gaan behoren.

De verwachting dat het aanpassen van halfgeleidergeheugenelementen aan logische circuits op eenvoudige en directe wijze zou kunnen geschieden vormde aanvankelijk het voornaamste argument voor de ontwikkeling van dit soort geheugens. De nu bestaande halfgeleidergeheugens blijken echter toch nog tamelijk ingewikkelde stuur- en detectiecircuits te vereisen. Naar de mening van de spreker ligt het accent tegenwoordig meer op de wijze waarop juist deze besturingscircuits met lage kosten in geïntegreerde vorm gerealiseerd kunnen worden. Wellicht zullen de moeilijkheden bij het in geïntegreerde vorm brengen van de besturingscircuits van magnetische geheugens eerder opgelost worden dan de moeilijkheden bij de fabricage van volledig in LSI-techniek uitgevoerde geheugens. De opmars van de halfgeleidergeheugens zal daardoor wellicht een aanzienlijke vertraging oplopen.

Large Scale Integration (*Dr. L. M. Spandorfer*)

Ter onderscheiding van de huidige geïntegreerde circuits waarbij een beperkt aantal logische circuits op een silicium 'chip' van ongeveer 1500-3500 mil^2 door middel van diffusieprocessen worden gefabriceerd, wordt met Large Scale Integration (LSI) de techniek aangeduid, waarbij een zeer groot aantal (50-1000) logische schakelingen op een chip wordt gefabriceerd.

De spreker gaf een overzicht van een aantal kenmerkende grootheden in de huidige geïntegreerde-circuittechniek, in de huidige LSI-techniek en in de te verwachten LSI-techniek.

Huidige geïntegreerde-circuittechniek.		
Oppervlak van een chip	:	1500-3500 mil^2
Diameter van een silicium 'wafer'	:	2 inch
Aantal chips per wafer	:	1000
Aantal bruikbare chips per wafer	:	500
Aantal logische schakelingen per chip	:	2-6
Aantal input/output verbindingen	:	± 14

Huidige LSI-techniek.		
Oppervlak van een chip	:	6000-12 000 mil^2
Diameter van een silicium 'wafer'	:	2 inch
Aantal LSI-chips per wafer	:	250
Aantal bruikbare LSI-chips per wafer	:	meer dan 13
Aantal logische schakelingen per chip	:	± 50

Toekomstige LSI-techniek.

Oppervlak van een chip	:	60 000 mil^2
Diameter van een silicium 'wafer'	:	3 inch
Aantal logische schakelingen per chip	:	1000

Bij de verwachting van het aantal logische schakelingen per chip is in het laatste geval geen rekening gehouden met beperkende factoren zoals dissipatie, ruimte benodigd voor de bedrading en het aanbrengen van externe verbindingen.

De fabricage van LSI's is in principe gelijk aan die van de huidige geïntegreerde circuits, zij het met veel stringentere eisen voor wat betreft de tolerantie (0,25 mil-0,1 mil). Het verbinden van het grote aantal logische schakelingen op een LSI-chip levert echter aanzienlijke moeilijkheden op. Het aantal verbindingen is namelijk zo groot dat men niet voldoende heeft aan één laag van opgedampte geleiders. Het toepassen van een tweede laag is noodzakelijk. De beide lagen worden van elkaar geïsoleerd door middel van een laag SiO_2 met een dikte van 1-4 μm.

Het toepassen van MOS-elementen in plaats van bipolaire elementen geeft aanzienlijke voordelen in de LSI-techniek. Niet alleen kunnen er meer elementen per oppervlakte-eenheid worden verwezenlijkt maar tevens is de fabricage van MOS-elementen eenvoudiger.

Voor wat betreft de kosten per logische poort in de LSI-techniek gaf de spreker de volgende cijfers:

Fabricagekosten van een Ø 2 inch wafer met 250 LSI-circuits	:	\$ 20,—
Kosten per LSI-circuit vóór het testen en verdere bewerkingen, uitgaande van 6 % bruikbare circuits per wafer	:	\$ 1,30
Kosten per logische poortschakeling vóór het testen en verdere bewerkingen (50 poorten per circuit)	:	\$ 0,025

Voor de kosten van het testen en van de verdere bewerkingen dient dit laatste bedrag met 100-200 % te worden vermeerderd. Hieruit blijkt dat de kosten per logische poort in de LSI-techniek belangrijk lager zijn dan in de huidige microcircuittechniek.

Er zijn echter een viertal factoren die deze plezierig lage uitkomst teniet dreigen te doen, te weten:

1. Het aantal verschillende LSI-circuits dat zal moeten worden vervaardigd en het aantal stuks van elke soort.
2. De ontwerpkosten.
3. De kosten van het testen van de zeer gecompliceerde chips.
4. De kosten ten gevolge van veranderingen tijdens de ontwikkelingsfase.

Het eerste punt illustreerde de spreker als volgt. Stel dat men een rekenmachine gaat fabriceren bestaande uit 2000 logische circuits. Uitgaande van de veronderstelling dat een LSI-circuit ongeveer 50 logische schakelingen bevat betekent dit waarschijnlijk dat deze rekenmachine ruwweg 50 volledige unieke LSI-circuits zal bevatten. Neemt men verder aan dat van deze rekenmachine een aanzienlijk aantal, zeg 1000 exemplaren, zal worden verkocht, dan betekent dit dat van elk van de 50 verschillende LSI-circuits slechts 1000 exemplaren nodig zijn. Een schrille tegenstelling met de min of meer algemeen geldende regel dat fabricage van halfgeleiderelementen pas aantrekkelijk wordt wanneer het gaat om series van meer dan 100 000 exemplaren! Denkt men dezelfde machine opgebouwd uit normale geïntegreerde circuits, dan zal men uitgaande van 6 verschillende circuits inderdaad op series komen die de 100 000 exemplaren overtreffen.

Het is tot nu toe nog niet duidelijk op welke wijze men de hier opgesomde kostenverhogende factoren zal kunnen omzeilen. De spreker noemde als mogelijkheid het gebruiken van een zogenaamde 'master-chip'. Hierop wordt een aantal logische circuits in een standaardconfiguratie aangebracht. Aan de hand van de door de klant gevraagde logische functies wordt dan naderhand een verbindingspatroon ontworpen en op de 'master-chip' aangebracht.

Ir. R. van Raamsdonk.

Varia

Fusie in de Britse Computer Industrie

Zoals bekend, probeert het Ministerie voor Technologie in Engeland door het vormen van grotere eenheden in de elektronische industrie te komen tot een versterking van de Engelse economie. De recente fusie van A.E.I. en G.E.C. in oktober 1967 is hiervan een voorbeeld.

Thans bereikt ons het bericht, dat ook op het gebied van de rekentuigindustrie een fusie heeft plaatsgevonden. In een nieuwe organisatie, de 'International Computers Limited' (I.C.L.) zullen de 'International Computers and Tabulators Ltd.' (I.C.T.), de 'English Electric' en 'Plessey' samenwerken. De I.C.L. zal de volgende computers op de markt brengen: de I.C.T. 1900, het English Electric systeem nr. 4 en de Elliott 4100-reeks.

Bovendien zal een nieuwe reeks computers voor de jaren '70 worden ontwikkeld; deze zullen kunnen samenwerken met de 1900 serie van I.C.T. en het systeem nr. 4 van English Electric. De regering heeft het voornemen £ 13,5 miljoen voor de komende 4 jaar ter beschikking te stellen ter ondersteuning van het research-programma van I.C.L. L.K.

The 8th International Conference on Medical and Biological Engineering and The 22nd Annual Conference on Engineering in Medicine and Biology

Van 20 tot en met 25 juli 1969 zal in het Palmer House, Chicago, Illinois, U.S., een conferentie worden gehouden over het onderwerp 'Medical and Biological Engineering'. Het voorlopige programma en verdere inlichtingen kan men verkrijgen bij: dr. B. van Eijnsbergen, Medisch-Fysisch Instituut TNO, Da Costakade 45, Utrecht.

Uit het NERG

Administratie van het NERG: Postbus 6108, Den Haag. Giro 94746 t.n.v. penningmeester NERG Den Haag.
Secretariaat van de Examencommissie-NERG: van Geusaustraat 151, Voorburg.

Ledenmutaties

Voorgestelde leden:
Ir. J. J. Visser, Jacoba van Beierenlaan 31, Delft.

Nieuwe adressen van leden:
Ir. J. A. J. Bouman, 'Eeckenrhode' Flat A 26, Aalst-Waalre (N.B.).
Ir. J. van Buuren, Het Leunenberg 942, Enschede.
Ir. J. Dijk, Parcivalstraat 26, Eindhoven.
Ir. C. Kamminga, Timorstraat 22, Delft.
Ir. Tj. v. d. Meulen, Indústria Brasileira de Eletricidade S.A., (Inbelsa) Rua Amador Bueno 474, Zona Postal 18, Caixa Postal 3159, Sáo Paulo, Brasil.
Ir. J. M. M. Veldstra, Vondellaan 20, Hilversum.
Ir. E. Vingerling, Zaadkorrelweg 24, Eemnes.
Ir. C. A. Vissers, Reelaan 9, Enschede.